



TUGAS AKHIR – MN141581

**MENENTUKAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA
KAPAL SELAM MINI DENGAN PENGUJIAN *WIND
TUNNEL***

**YOGI ARDIYANSYAH
NRP. 4110 100 070**

Aries Sulisetyono, S.T., MA.Sc., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOG KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



TUGAS AKHIR – MN141581

**MENENTUKAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA
KAPAL SELAM MINI DENGAN PENGUJIAN *WIND
TUNNEL***

**YOGI ARDIYANSYAH
NRP. 4110 100 070**

Aries Sulisetyono, S.T., MA.Sc., Ph.D.

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**



FINAL PROJECT – MN141581

**DETERMINING THE HYDRODYNAMICS
COEFFICIENT OF MINI SUBMARINE BY WIND
TUNNEL EXPERIMENT**

**YOGI ARDIYANSYAH
NRP. 4110 100 070**

Aries Sulisetyono ST., MA.Sc., Ph.D.

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE & SHIPBUILDING
ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017**

LEMBAR PENGESAHAN

MENENTUKAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA KAPAL SELAM MINI DENGAN PENGUJIAN *WIND TUNNEL*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika
Program S1 Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

YOGI ARDIYANSYAH
NRP. 4110 100 070

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing I

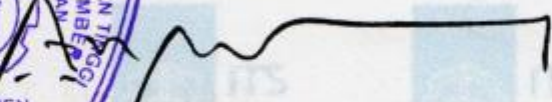


Aries Sulisetyono ST., MA.Sc., Ph.D.
NIP. 19710320 199512 1 002

Mengetahui,

Kepala Departemen Teknik Perkapalan




Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 20 April 2017

LEMBAR REVISI

MENENTUKAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA KAPAL SELAM MINI DENGAN PENGUJIAN WIND TUNNEL

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 13 April 2017

Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika
Program S1 Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

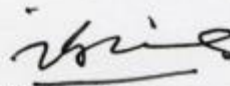
YOGI ARDIYANSYAH

NRP. 4110 100 070

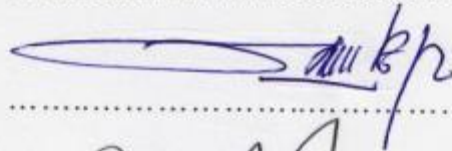
Disahkan kepada kedua orang tua saya segala dukungan dan doanya

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

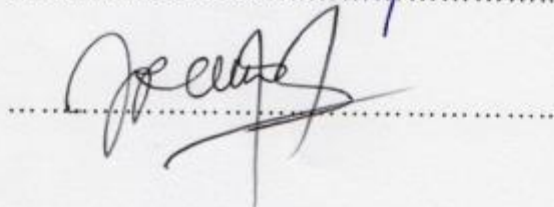
1. Dr. Ir. I Ketut Suastika



2. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T.

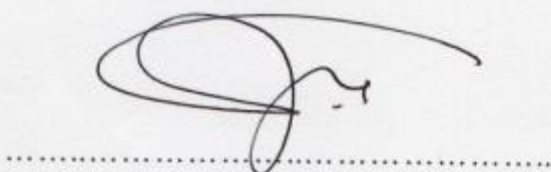


3. Sri Rejeki Wahyu Pribadi, S.T., M.T



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Aries Sulisetyono, S.T., MA.Sc., Ph.D.



Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Aries Sulisetyono ST., MA.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Dony Setyawan, S.T, M.Eng Selaku Dosen Wali atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Prof. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Perkapalan yang telah memberikan kemudahan sarana dan prasarana sehingga tugas akhir ini selesai.
4. Kepala Laboratorium Mesin dan Mekanika Fluida Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mengizinkan Penulis menggunakan fasilitasnya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Orangtua dan keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan. Teman-teman P48, P49, P51, P52.
6. Kawan seangkatan CAPTAIN P50 atas dukungan dan motivasinya yang luar biasa.
7. Sahabat saya, Indah Purwaningtyas, Imamsyah Roni, Yuke W dan Satria Mandala Putra atas bantuannya.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 20 April 2017

Yogi Ardiyansyah

MENENTUKAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA KAPAL SELAM MINI DENGAN PENGUJIAN WIND TUNNEL

Nama Mahasiswa : Yogi Ardiyansyah
NRP : 4110 100 070
Departemen/Fakultas : Teknik Perkapalan/Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Pada proses perancangan kapal selam mini harus dilakukan analisa hidrodinamika yang baik. Performa yang baik akan membuat kapal selam mini mencapai suatu kondisi yang stabil dalam beroperasi. Hal utama yang harus diperhitungkan adalah mengenai koefisien hidrodinamika. Koefisien ini bisa dihitung dengan metode numerik yang terdapat dalam buku karangan *Newman* yang berjudul *Marine Hydrodynamic*. Input data yang diperlukan dari perhitungan numerik ini adalah koefisien drag C_D dan Koefisien lift C_L . Data ini diperoleh dengan melakukan uji model di terowongan *wind tunnel*. Dari hasil pengujian dan perhitungan didapatkan hasil bahwa Kapal selam menerima gaya tambahan *fin lift* dan *fin lift moment* akibat adanya penambahan fin. Selain itu seiring dengan perubahan kecepatan, kapal selam menerima komponen hidrodinamika *restoring force*, *damping force*, dan *restoring moment* yang semakin besar dan komponen *damping moment* yang semakin kecil. Sedangkan untuk perubahan sudut, terjadi perubahan nilai komponen *restoring force*, *restoring moment* M_{uw} dan koefisien *fin lift moment* $Y_{uu\delta r}$ yang semakin besar.

Kata kunci : kapal selam mini, fin, barehull, *wind tunnel*, hidrodinamika, koefisien *lift*, koefisien *drag*

DETERMINING THE HYDRODYNAMICS COEFFICIENT OF MINI SUBMARINE BY WIND TUNNEL EXPERIMENT

Author : Yogi Ardiyansyah
ID No. : 4110 100 070
Dept. / Faculty : Teknik Perkapalan/Teknologi Kelautan
Supervisors : Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

In the process of designing the mini-submarine, the thing we should do is analysing of the hydrodynamic performance. The mini-submarine will be able to achieve a stable condition in the operation by a good performance. The main thing that should be measured is the hydrodynamic coefficient. This coefficient can be calculated by numerical methods contained in the book by *Newman*, entitled *Marine Hydrodynamic*. Input data required from numerical calculations are drag coefficient C_D and lift coefficient C_L . This data can be obtained by doing test in wind tunnel. The results showed that the mini submarine received added fin lift force and fin lift moment due to the additional of fin. Moreover along with change of speed, the mini submarine received hydrodynamic components such as restoring force, damping force and restoring moment that is getting bigger and damping moments are smaller. Meanwhile due to change of angle, the value of restoring force, restoring moment M_{uw} and fin lift moment Y_{uudr} are increased.

Keywords : mini submarine, fin, barehull, *wind tunnel*, hydrodynamic, lift coefficient, drag coefficient

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
LEMBAR REVISI.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang Masalah	1
I.2. Perumusan Masalah	1
I.3. Tujuan	2
I.4. Batasan Masalah	2
I.5. Manfaat Penelitian	2
I.6. Hipotesis	2
BAB II STUDI LITERATUR	3
II.1 Tinjauan Pustaka.....	3
II.2 Kapal Selam Mini	5
II.2.1 Sistem Koordinat	5
II.2.2 Persamaan Gerak	6
II.2.3 <i>Added Mass</i>	14
II.2.4 Koefisien Hidrodinamika	17
II.3 Wind Tunnel Experiments	18
II.3.1 Jenis-Jenis Wind Tunnel.....	19
II.3.2 Pengukuran Gaya dan Kecepatan	20
BAB III METODOLOGI	23
III.1 Studi Literatur	23
III.2 Bahan dan Peralatan.....	23
III.3 Proses Pengerjaan	28
III.4 Lokasi Pengerjaan.....	30
III.5 Bagan Alir.....	31

BAB IV HASIL PERCOBAAN.....	33
IV.1 Data Eksperimen Wind Tunnel.....	33
IV.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds	33
IV.1.2 Pengukuran Drag Force dan Lift Force	34
IV.2 <i>Blockage Effect Ratio</i>	44
BAB V PERHITUNGAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA.....	47
V.1 Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull	48
V.1.1 Kecepatan 15.430 m/s.....	48
V.1.2 Kecepatan 18.006 m/s.....	55
V.1.3 Kecepatan 20.578 m/s.....	56
V.1.4 Kecepatan 23.150 m/s.....	57
V.1.5 Kecepatan 25.772 m/s.....	58
V.2 Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin	59
V.2.1 Kecepatan 15.430 m/s.....	59
V.2.2 Kecepatan 18.006 m/s.....	60
V.2.3 Kecepatan 20.578 m/s.....	61
V.2.4 Kecepatan 23.150 m/s.....	62
V.2.5 Kecepatan 25.772 m/s.....	63
BAB VI PEMBAHASAN	65
VI.1 Restoring Force	65
VI.1.1 Variasi Barehull.....	65
VI.1.2 Variasi Fin	67
VI.2 Damping Force	69
VI.3 Restoring Momen	71
VI.3.1 Variasi Barehull.....	71
VI.3.2 Variasi Fin	72
VI.4 Damping Momen	74
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN	75
VII.1 Kesimpulan	75
VII.2 Saran	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. Model Kapal Selam Mini (Sulisetyono, 2012)	4
Gambar II.2. Sistem Koordinat.....	5
Gambar II.3 Hull Drag: C_d versus α , $V = 0.5$ m/s.	9
Gambar II.4 Hull Lift: C_L versus α , $V=0.5$ m/s. Slope: $C_{L\alpha} = 4.79$ rad. ⁻¹	10
Gambar II.5 Hull Moment: C_m versus α , $V=0.5$ m/s. Slope: $C_{M\alpha} = 0.0974$ rad ⁻¹	11
Gambar II.6 Profil <i>Prolate Ellipsoid</i>	15
Gambar II.7. Grafik Added Mass	16
Gambar II.8 Open Circuit Subsonic Wind Tunnel Teknik Mesin ITS.....	18
Gambar II.9. Open Circuit Wind Tunnel di ITS	19
Gambar II.10 Closed Circuit Wind Tunnel	20
Gambar III.1. Wind Tunnel dengan Force Balancing Method.....	24
Gambar III.2 Variasi Barehull	25
Gambar III.3 Variasi Fin	25
Gambar III.4 Variasi Sudut 0°	26
Gambar III.5 Variasi Sudut 10°	26
Gambar III.6 Variasi Sudut 16°	27
Gambar III.7 Variasi Sudut 20°	27
Gambar III.8 Indikator Drag Force pada proses Pengujian.....	28
Gambar III.9 Indikator Lift Force pada proses Pengujian.....	29
Gambar III.10 Pengukuran Drag Force	29
Gambar IV.1 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 4.455$ m/s	35
Gambar IV.2 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 5.198$ m/s	36
Gambar IV.3 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 5.940$ m/s	36
Gambar IV.4 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 6.683$ m/s	37
Gambar IV.5 Grafik Koefisien Drag Lift pada $V_s = 7.425$ m/s	37
Gambar IV.6 Grafik Koefisien Drag Terhadap Bilangan Reynold	38
Gambar IV.7 Grafik Koefisien Lift Terhadap Bilangan Reynold	38
Gambar IV.8 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 4.455$ m/s	40
Gambar IV.9 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 5.198$ m/s	41

Gambar IV.10 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 5.940$ m/s	41
Gambar IV.11 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 6.683$ m/s	42
Gambar IV.12 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 7.425$ m/s	42
Gambar IV.13 Grafik Koefisien Drag Terhadap Bilangan Reynold	43
Gambar IV.14 Grafik Koefisien Lift Terhadap Bilangan Reynold	44
Gambar V.1. Kurva Perhitungan Added Mass	47
Gambar V.2 Hull Drag : C_D vs θ , $V = 30$ knot	48
Gambar VI.1 <i>Restoring Force Yuv</i> Variasi Barehull	66
Gambar VI.2 <i>Restoring Force -Zuw</i> Variasi Barehull	67
Gambar VI.3 <i>Restoring Force Yuv</i> Variasi Fin	68
Gambar VI.4 <i>Restoring Force -Zuw</i> Variasi Fin	68
Gambar VI.5 <i>Damping Force Yur</i> Variasi Fin	70
Gambar VI.6 <i>Damping Force Zuq</i> Variasi Fin	70
Gambar VI.7 <i>Restoring Momen Muw</i> Variasi Barehull	71
Gambar VI.8 <i>Restoring Momen Nuv</i> Variasi Barehull	72
Gambar VI.9 <i>Restoring Momen Muv</i> Variasi Fin	73
Gambar VI.10 <i>Restoring Moment Nuv</i> Variasi Fin	73
Gambar VI.11 <i>Damping Momen Muq dan Nur</i> Variasi Fin	74

DAFTAR TABEL

Tabel III.1 Dimensi Utama kapal Selam Mini	24
Tabel IV.1 Drag Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Barehull sudut 0 °.....	34
Tabel IV.2 Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Barehull sudut 10 °.....	34
Tabel IV.3 Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Barehull sudut 16 °.....	35
Tabel IV.4 Drag Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Barehull sudut 20 °.....	35
Tabel IV.5 Drag Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Fin sudut 0 °.....	39
Tabel IV.6 Drag Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Fin sudut 10 °.....	39
Tabel IV.7 Drag Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Fin sudut 16°.....	40
Tabel IV.8 Drag Force, Lift Force,Cd dan CL Varisasi Fin sudut 20°.....	40
Tabel IV.9. Koreksi CD pada variasi Barehull.....	45
Tabel IV.10. Koreksi CD pada variasi fin.....	46
Tabel V.1 Nilai Momen dan Koefisien Momen Barehull, Vs = 30 knot	49
Tabel V.2 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, Vs = 15.433 m/s.....	54
Tabel V.3 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, Vs = 18.006 m/s.....	55
Tabel V.4 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, Vs = 20.578 m/s.....	56
Tabel V.5 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, Vs = 23.150 m/s.....	57
Tabel V.6 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, Vs = 25.772 m/s.....	58
Tabel V.7 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, Vs = 15.430 m/s	59
Tabel V.8 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, Vs = 18.006 m/s	60
Tabel V.9 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, Vs = 20.578 m/s	61
Tabel V.10 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, Vs = 23.150 m/s	62
Tabel V.11 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, Vs = 25.772 m/s	63

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

L	= Panjang (m)
B	= Lebar (m)
H	= Tinggi (m)
V	= Kecepatan (m/s^2)
A	= Luas (m^2)
CL	= Coefficient of lift
CD	= Coefficient of drag
Re	= Reynolds number
RD	= Drag (N)
FL	= Lift (N)
$X_{\dot{u}}$	= Koefisien Added Mass
X_{uw}	= Koefisien Axial Drag
X_{uv}	= Koefisien Axial Drag
X_{vr}	= Koefisien Added Mass Cross Term
X_{wq}	= Koefisien Added Mass Cross Term
X_{rr}	= Koefisien added Mass Cross Term
$Y_{uu\delta r}$	= Koefisien Fin Lift
Y_{uv}	= Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
Y_{ur}	= Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
$Y_{\dot{v}}$	= Koefisien Added Mass
Y_{wp}	= Koefisien Added Mass Cross Term
Y_{pq}	= Koefisien Added Mass Cross Term
$Y_{\dot{r}}$	= Koefisien Added Mass
$Z_{uu\delta s}$	= Koefisien Fin Lift

Z_{uw}	= Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
Z_{uq}	= Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
Z_{vp}	= Koefisien Added Mass Cross Term
$Z_{\dot{w}}$	= Koefisien Added Mass
$Z_{\dot{q}}$	= Koefisien Added Mass
Z_{rp}	= Koefisien Added Mass Cross Term
$M_{uu\delta s}$	= Koefisien Fin Moment
M_{uw}	= Body dan Fin dan Munk Moment
M_{uq}	= Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
M_{vp}	= Koefisien Added Mass Cross Term
$M_{\dot{w}}$	= Koefisien Added Mass
$M_{\dot{q}}$	= Koefisien Added Mass
$N_{uu\delta r}$	= Koefisien Fin Moment
N_{uv}	= Body dan Fin dan Munk Moment
N_{ur}	= Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
$N_{\dot{v}}$	= Koefisien Added Mass
N_{wp}	= Koefisien Added Mass Cross Term
$N_{\dot{r}}$	= Koefisien Added Mass

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

Dunia perkapalan Indonesia sudah semakin bergerak maju. Hal ini telah dibuktikan dengan pembangunan kapal-kapal besar di dalam negeri. Kapal-kapal yang telah dibangun kini telah berhasil beroperasi dengan baik. Namun produksi teknologi kapal selam untuk monitoring bawah laut masih minim. Indonesia masih belum mampu untuk memproduksi kapal selam sendiri, melainkan masih belajar dan bekerjasama dengan pihak asing.

Teknologi merupakan masalah yang perlu dikembangkan untuk menyelesaikan kekurangan yang ada. Banyak metodologi yang telah dikembangkan untuk memonitoring kondisi bawah laut, mulai dari konvensional maupun dengan menggunakan teknologi modern. Metode konvensional dilakukan dengan bantuan para penyelam tradisional, sedang metode berteknologi tinggi menggunakan kapal selam mini. Kapal selam mini merupakan sebuah kendaraan yang dikendalikan dengan menggunakan *remote control*. Namun pada kenyataannya kendaraan ini masih sangat mahal dari segi ekonomi.

Di dalam air, kapal selam ini akan menerima berbagai macam gaya hidrodinamika akibat pergerakannya. Oleh karena itu agar kapal selam ini memiliki *performance* yang bagus dan mampu bermanuver dengan baik maka perlu dilakukan perhitungan analisa hidrodinamika. Perhitungan ini nantinya akan memberikan output berupa koefisien-koefisien hidrodinamika yang diterima oleh kapal selam.

I.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Berapa besar koefisien hidrodinamika yang terjadi pada kapal selam?
2. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan terhadap besarnya koefisien hidrodinamika?
3. Bagaimana pengaruh variasi sudut terhadap besarnya koefisien hidrodinamika?
4. Bagaimana pengaruh adanya *fin* dan tanpa *fin* (barehull) terhadap besarnya koefisien hidrodinamika?

I.3. Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Untuk mengetahui besarnya koefisien hidrodinamika pada kapal selam.
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan terhadap besarnya koefisien hidrodinamika kapal.
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut terhadap besarnya koefisien hidrodinamika.
4. Untuk mengetahui pengaruh variasi ada dan tidak adanya fin terhadap besarnya koefisien hidrodinamika.

I.4. Batasan Masalah

Batasan-batasan yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Ukuran utama kapal selam mini; $L = 6000 \text{ mm}$; $B = 533 \text{ mm}$; $H = 533 \text{ mm}$.
2. Terdapat 5 variasi kecepatan, yaitu 15.430 m/s , 18.006 m/s , 20.576 m/s , 23.150 m/s dan 25.722 m/s .
3. Terdapat 4 variasi sudut, yaitu 0° , 10° , 16° dan 20° .
4. Terdapat variasi *barehull* dan menggunakan *fin*.
5. Model kapal selam didesain tanpa *propeller*.

I.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Memberikan uraian tentang besarnya koefisien hidrodinamika yang terjadi pada kapal selam.
2. Memberikan hasil perbandingan antara variasi *barehull* dan variasi *fin* terhadap besarnya koefisien hidrodinamika.
3. Memberikan uraian tentang performa kapal selam akibat adanya gaya- gaya hidrodinamika yang terjadi pada kapal selam.

I.6. Hipotesis

1. Nilai Koefisien Hidrodinamika yang diterima pada kapal selam dengan fin lebih besar daripada tanpa menggunakan fin.
2. Semakin tinggi kecepatan kapal selam, semakin tinggi pula nilai koefisien hidrodinamika yang dihasilkan.

BAB II

STUDI LITERATUR

II.1 Tinjauan Pustaka

Pada perkembangan teknologi kendaraan bawah air secara umum dibagi menjadi dua yaitu pertama, *Autonomous Underwater Vehicles* (AUV) yang merupakan kendaraan bawah air yang beroperasi pada permukaan air secara otomatis tanpa ada kontak dengan manusia. Wang et al [1992] dari Stanford University telah mengembangkan *Unmanned Underwater Vehicle* (UUVs) yang sudah terdapat kamera dalam pengoperasiannya. Kemudian Willian dan Mahon [2006] juga mengembangkan UUVs dengan nama Omeron yang dioperasikan di sekitar karang Great Barrier Reef Australia untuk survei lingkungan. Dalam hal pengoperasiannya, video dapat dioperasikan dari permukaan yang sinyalnya di transmisikan ke video dengan menggunakan *tether*. Kemudian kedua, *Remotely Underwater Vehicle* (ROV) yang merupakan kendaraan bawah air yang gerakannya dioperasikan secara langsung melalui kabel oleh manusia yang berada di permukaan air.

Definisi ROV (Remotely Operated Vehicle) menurut Marine Technology Society ROV Committee's dalam "Operational Guidelines for ROVs" (1984) dan The National Research Council Committee's dalam "Undersea Vehicles and National Needs" (1996) adalah pada dasarnya sebuah robot bawah laut yang dikendalikan oleh operator ROV, untuk tetap dalam kondisi yang aman, pada saat ROV bekerja di lingkungan yang berbahaya. Remote Operation Vehicle (ROV) secara luas dikenal sebagai nama umum dengan kapal selam mini yang kerap digunakan pada industri minyak dan gas lepas pantai. Kapal selam ini tak berawak, tapi dioperasikan dari kapal lain. Keduanya terhubung melalui kabel yang berfungsi juga sebagai penambat. Kapal selam mini tersusun dari satu set pengapung besar di atas sasis baja atau aluminium. Pengapung itu biasanya terbuat dari busa sintetis. Pada bagian bawah konstruksi terpasang alat-alat sensor yang berat. Komposisi ini merupakan komponen ringan di atas dan berat di bawah yang akan menghasilkan pemisahan yang besar antara pusat apung dan pusat gravitasi. Maka alat ini pun lebih stabil di dasar laut saat melakukan tugas-tugasnya. kapal selam mini memiliki kemampuan manuver yang tinggi. Kabel tambat berfungsi mengirimkan energi listrik serta data video dan sinyal. Saat bertugas memasang kabel listrik tegangan tinggi, kapal selam mini biasanya ditambahkan tenaga hidrolik.

Banyak penelitian yang telah dikembangkan sebelumnya mengenai kapal selam mini. Pada tahun 2009 telah dilakukan perancangan kapal selam mini sebagai *monitoring* pada

daerah pesisir pantai. Kapal selam mini ini beroperasi untuk mengatasi masalah polusi dan *sewage* pada daerah pesisir pantai. Awal dari penelitian ini mempunyai ukuran yang relatif kecil, yang mana mempunyai panjang 1 meter. Kemudian pada penelitian ini juga dihasilkan masalah mengenai *dynamics stability* pada kapal selam mini pada pengoperasian bawah air (Sulisetyono, 2009). Kemudian dalam perjalanannya dilakukan inovasi pada desain kapal selam mini mengenai ukuran utamanya. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan peralatan yang akan di pasang pada kapal selam mini, mengingat pada desain ini kapal selam mini beroperasi tanpa awak. Banyak peralatan elektronik yang akan dipasang untuk tujuan pengoperasian, seperti kamera, perangkat *wireless* sebagai transfer data, perangkat *control* dan sebagainya. Pada perkembangan kapal selam mini tersebut dipakai panjang sebesar 2 meter yang mana mengalami perubahan panjang dari penelitian sebelumnya. Kemudian pada penelitian tersebut juga sudah dibuat model dengan ukuran skala 1:1 dengan panjang 2 meter yang dapat dilihat pada gambar 1. Pada penelitian tersebut dilakukan analisis secara numerik bahwa ROV ini memiliki *performance* hidrodinamika yang baik, yang mana terbukti dengan grafik evolusi gerakan ROV yang mampu mencapai kondisi stabil dalam waktu kurang dari 30 detik. Kemudian berdasarkan analisis *dynamic control* dengan menggunakan Matlab, ROV ini mampu mencapai kondisi stabil dengan *delay time* yang kecil dalam waktu *settle time* kurang dari 10 detik. (Prisdianto, 2012).



Gambar II.1. Model Kapal Selam Mini (Sulisetyono, 2012)

II.2 Kapal Selam Mini

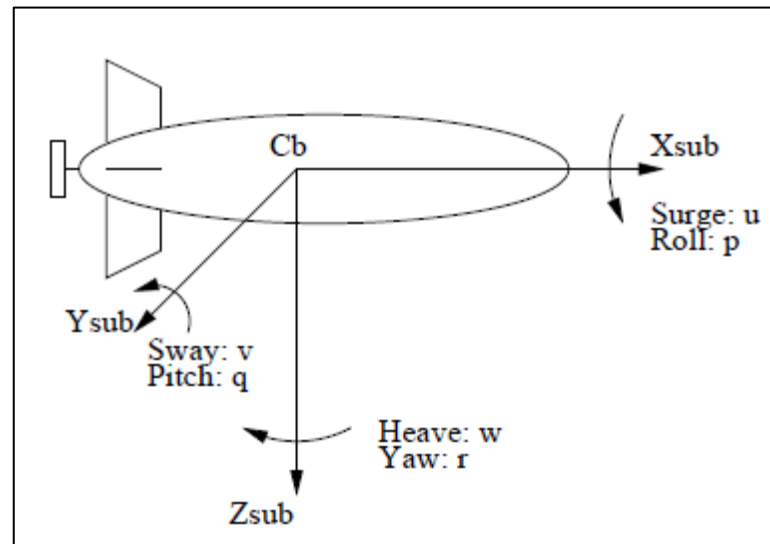
II.2.1 Sistem Koordinat

Istilah dalam persamaan gerak yang mewakili gaya hidrodinamika dan momen yang bekerja pada suatu benda sering dikembangkan dalam series Taylor tentang beberapa kondisi. Untuk kapal, kondisi referensi ini biasanya diambil sebagai kondisi ekuilibrium gerakan maju dengan kecepatan konstan U_0 . Sistem koordinat sumbu x terletak disepanjang sumbu memanjang dengan arah positif menghadap ke depan. Sedangkan sumbu y terlatak disepanjang arah kanan positif dan sumbu z ke arah atas bidang. Tiga komponen koordinat ini kemudian dilambangkan dengan X , Y dan Z , dan tiga komponen torsinya masing-masing dilambangkan dengan K , M dan N . Gambar II.2 menunjukkan system koordinat kapal. Kapal juga memiliki komponen kecepatan searah sumbu y dan z masing-masing dilambangkan dengan v dan w . Sehingga nilai pendekatannya menjadi :

$$|u|, |v|, |w| \ll |U_0| \quad (II.1)$$

Kapal juga bisa memperoleh kecepatan sudut p , q dan r yang masing-masing searah sumbu x , y , dan z , sehingga dapat diasumsikan :

$$|p|/U_0, |q|/U_0, |r|/U_0 \ll 1 \quad (II.2)$$



Gambar II.2. Sistem Koordinat

(Sumber: *Submarine Dynamic Modeling*)

Dimana l adalah panjang kapal. Tiga komponen gaya X , Y , dan Z dan tiga komponen torsi K , M , dan N kemudian dihubungkan dalam kecepatan linier u , v , dan w dan kecepatan

sudut p, q dan r, dimana kecepatan ini merupakan menjadi gangguan terhadap kondisi keseimbangan gerak. *Formula* untuk menghitung besar gaya dan momen diperoleh dari :

$$X = X_o + X_u u + X_v v + X_w w + X_p p + X_q q + X_r r \quad (\text{II.3})$$

$$Y = Y_o + Y_u u + Y_v v + Y_w w + Y_p p + Y_q q + Y_r r \quad (\text{II.4})$$

$$Z = Z_o + Z_u u + Z_v v + Z_w w + Z_p p + Z_q q + Z_r r \quad (\text{II.5})$$

$$K = K_o + K_u u + K_v v + K_w w + K_p p + K_q q + K_r r \quad (\text{II.6})$$

$$M = M_o + M_u u + M_v v + M_w w + M_p p + M_q q + M_r r \quad (\text{II.7})$$

$$N = N_o + N_u u + N_v v + N_w w + N_p p + N_q q + N_r r \quad (\text{II.8})$$

II.2.2 Persamaan Gerak

Posisi Cb ditempatkan di titik gaya apung dan titik berat di titik $\mathbf{r}_G = [x_G, y_G, z_G]^T$. Komponen \mathbf{r}_G tampak kecil karena kapal selam ini sengaja dirancang agar titik berat dan titik apungnya bertepatan. Simbol-simbol berikut digunakan untuk arah X, Y dan Z.

$$\text{Gaya (force)} = [X, Y, Z]^T \quad \text{Momen} = [K, M, N]^T$$

$$\text{Kecepatan} = [u, v, w]^T \quad \text{Kecepatan sudut } \omega = [p, q, r]^T$$

Persamaan gerak newton, untuk benda padat dengan 6 derajat kebebasan, relatif terhadap koordinat body di Cb, yaitu $\Sigma \mathbf{F} = m \mathbf{a}_G$ dimana :

m = massa dari kapal selam

a_G = percepatan

dengan mensubstitusikan $a_G = \frac{\delta v}{\delta t} + \omega \times V + \dot{\omega} \times r_G + \omega \times \omega \times r_G$ diperoleh persamaan gaya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= \sum X_{ext} \\ m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= \sum Y_{ext} \\ m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= \sum Z_{ext} \end{aligned} \quad (\text{II.9})$$

Persamaan gerak Euler, untuk benda pejal dengan 6 derajat kebebasan, yang terpusat di Cb adalah $\Sigma M_B = H_G + \dot{r}_G \cdot m a_G$. Laju perubahan momentum sudut terhadap titik beratnya, $H_G = [I]\dot{\omega} + \dot{\omega} \times [I]\omega$, dimana $[I]$ adalah matriks inersia diagonal [3x3] $[I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}]$ dievaluasi tentang letak sumbu utama di titik beratnya.

Substitusikan lagi a_G , dengan mengabaikan hal kecil (misal x_G^2), diperoleh persamaan momen searah sumbu X,Y dan Z sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
I_{xx}\dot{p} + (I_{xx} - I_{yy})qr - m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= \sum K_{ext} \\
I_{xx}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= \sum M_{ext} \\
I_{xx}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= \sum N_{ext}
\end{aligned} \tag{II.10}$$

Terdapat 5 gaya atau momen yang bekerja pada badan kapal, yaitu :

1. Gaya Hidrostatik

Orientasi *body frame* yang relatif terhadap frame dideskripsikan oleh Euler mengenai sudut putar *roll* ϕ , *pitch* θ , *yaw* ψ . Gaya statis, berat (W) dan gaya apung (B) bekerja terhadap titik berat dan titik apung masing-masing. Jika diterapkan pada badan kapal selam, maka menjadi :

$$\begin{aligned}
X_{HS} &= -(W - B)\sin\theta \\
Y_{HS} &= (W - B)\cos\theta\sin\phi \\
Z_{HS} &= (W - B)\cos\theta\cos\phi \\
K_{HS} &= -y_G W \cos\theta \cos\phi - z_G W \cos\theta \sin\phi \\
M_{HS} &= -z_G W \sin\theta - x_G W \cos\theta \cos\phi \\
N_{HS} &= -y_G W \cos\theta \sin\phi - z_G W \sin\theta
\end{aligned} \tag{II.11}$$

2. Gaya Inersia Added Mass

Added Mass adalah perhitungan penambahan inersia yang diakibatkan oleh air yang dipercepat dengan kapal selam. Gaya dan momen yang diperoleh akibat added mass bisa ditulis dalam bentuk :

$$\begin{aligned}
X_A &= X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}q^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\
Y_A &= Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur_{\alpha}}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq \\
Z_A &= Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq_{\alpha}}uq + Z_{vp}vp + Y_{rp}rp \\
K_A &= K_p\dot{p} \\
M_A &= M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uw_{\alpha}}uw + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uq_{\alpha}}uq \\
N_A &= N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{uv_{\alpha}}uv + N_{wp}wp + M_{pq}pq + N_{ur_{\alpha}}ur
\end{aligned} \tag{II.12}$$

Dimana misalnya, $\dot{X}_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} [kg]$ dan $K_{\dot{p}} = \frac{\partial K}{\partial \dot{p}} [kgm^2]$ dan lainnya, adalah *added mass* dan momen inersia *added mass*. $X_{\dot{u}}$ axial dan $K_{\dot{p}}$ *rolling added mass* diestimasi dari hubungan empiris oleh Blevins[1984] dan *crossflow added mass* ($Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}}, M_{\dot{w}}, N_{\dot{v}} = -M_{\dot{w}}, Y_{\dot{r}} = N_{\dot{v}}, Z_{\dot{q}} = M_{\dot{w}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}}$) dievaluasi secara numerik menggunakan teknik oleh Newman[1980].

Hasil *cross-terms* yang tersisa dari hubungan *added mass* dan bisa dievaluasi dari bentuk *added mass* yang sudah diturunkan.

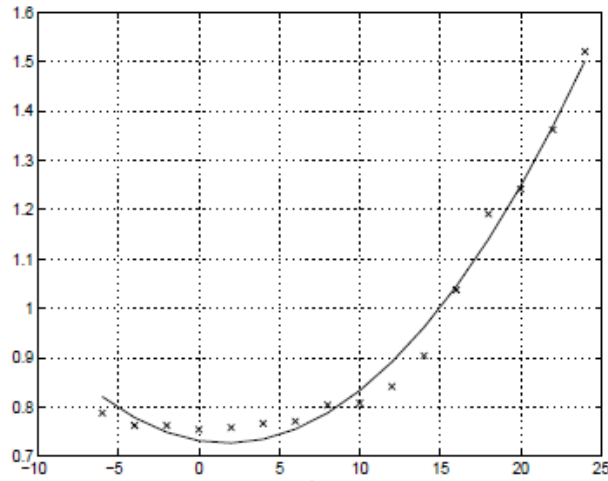
$$\begin{aligned}
X_{wq} &= Z_{\dot{w}} & X_{qq} &= Z_{\dot{q}} \\
X_{vr} &= -Y_{\dot{v}} & X_{rr} &= -Y_{\dot{r}} \\
Y_{ur\alpha} &= X_{\dot{u}} & Y_{wp} &= -Z_{\dot{w}} \\
Y_{pq} &= -Z_{\dot{q}} & & \\
Z_{uq\alpha} &= -X_{\dot{u}} & Z_{vp} &= Y_{\dot{v}} \\
Z_{rp} &= Y_{\dot{r}} & & \\
M_{uw\alpha} &= -(Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}}) & M_{vp} &= -Y_{\dot{r}} \\
M_{rp} &= (K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}}) & M_{uq\alpha} &= -Z_{\dot{q}} \\
N_{uv\alpha} &= -(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}}) & N_{wp} &= Z_{\dot{q}} \\
N_{pq} &= -(K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}}) & N_{ur\alpha} &= Y_{\dot{r}}
\end{aligned} \tag{II.13}$$

3. Gaya dan Momen Hidrodinamika serta Gaya dan Momen *Hull*

Drag berhubungan dengan density fluida, luasan frontal kapal selam A_f dan arah kecepatan.

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V^2 \tag{II.14}$$

C_d berhubungan dengan angle of attack (α) terhadap hubungan parabola yang diplot pada gambar II.3.



Gambar II.3 Hull Drag: C_d versus α , $V = 0.5$ m/s.
(Sumber: *Submarine Dynamic Modeling*)

$$C_D = a\alpha^2 + b\alpha + c \quad (\text{II.15})$$

Diasumsikan bahwa kecepatan *sway* (v) dan kecepatan *heave* (w) adalah kecil dibanding dengan *kecepatan surge* (u). *Angle of attack* bisa ditulis : pada *plane XY* sebagai $\tan \alpha \approx \alpha = w/u$ [radian], atau pada bidang *XY* sebagai $\tan \beta \approx \beta = v/u$ [radian]. Gaya drag, ketika dilihat dari bidang *XZ*, bisa diselesaikan terhadap sumbu $X_{\text{sub-}}$ dan $Z_{\text{sub-}}$.

$$D_x = -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + w^2) \cos \alpha$$

$$D_x \approx -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + w^2) \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right) \quad (\text{II.16})$$

$$D_z = -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + w^2) \sin \alpha$$

$$D_z \approx -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + w^2) \alpha$$

Dengan cara yang sama, gaya drag jika dilihat dari bidang *XY* , bisa diselesaikan terhadap sumbu $X_{\text{sub-}}$ dan $Y_{\text{sub-}}$.

$$D_x = -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + v^2) \cos \beta$$

$$D_x \approx -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + v^2) \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) \quad (\text{II.17})$$

$$D_z = -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + v^2) \sin \beta$$

$$D_z \approx -\frac{1}{2}\rho A_f C_D (u^2 + v^2) \beta$$

Meneruskan persamaan II.16 dan II.17, terhadap C_D , α dan β , dan mengabaikan hal di luar orde kedua, maka total komponen gaya drag di sumbu $X_{\text{sub-}}$, $Y_{\text{sub-}}$ dan $Z_{\text{sub-}}$ menjadi :

$$X_d = X_{u|u}|u|u| + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{v|v}|v|v| + X_{w|w}|w|w|$$

$$Y_d = Y_{uv_d}uv + Y_{v|v}|v|v|$$

$$Z_d = Z_{uw_d}uw + Z_{w|w}|w|w| \quad (\text{II.18})$$

Dimana :

$$X_{u|u}|u| = -\frac{1}{2}(\rho A_f)c$$

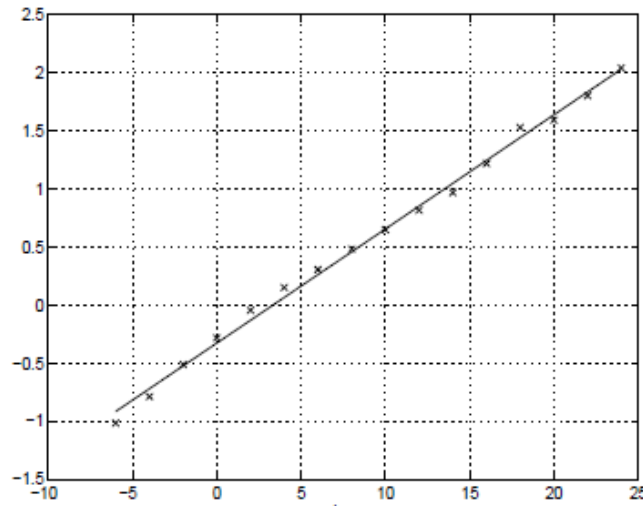
$$X_{uw} = X_{uv} = -\left(\frac{1}{2}\rho A_f\right)b$$

$$X_{w|w}|w| = X_{v|v}|v| = -\left(\frac{1}{2}\rho A_f\right)\left(a + \frac{c}{2}\right) \quad (\text{II.19})$$

$$-Y_{v|v}|v| = Z_{w|w}|w| = -\left(\frac{1}{2}\rho A_f\right)b$$

$$Z_{uw_d} = -Y_{uv_d} = -\frac{1}{2}(\rho A_f)c$$

Lift L , bekerja di pusat tekan, ke arah tegak lurus aliran, sebagaimana kapal selam bergerak terhadap air. Relokasi gaya ini untuk bekerja pada titik apung menyebabkan pitching momen M timbul. Lift dan momen berbanding lurus dengan *angle of attack* dan telah diplot pada gambar 4 dan 5



Gambar II.4 Hull Lift: C_L versus α , $V=0.5\text{m/s}$. Slope: $C_{L\alpha} = 4.79 \text{ rad}^{-1}$

(Sumber: *Submarine Dynamic Modeling*)

$$L = \frac{1}{2}\rho C_L A_f V^2$$

$$C_{L\alpha} = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$$

$$M = \frac{1}{2}\rho C_M A_f V^2$$

$$C_{M\alpha} = \frac{\partial C_M}{\partial \alpha}$$

(II.20)

Gaya lift dan momen pitching, ketika dilihat pada bidang XZ merupakan turunan dari persamaan II.20 :

$$Z_l = -\frac{1}{2}\rho A_f C_{L_\alpha}(u^2 + w^2)\alpha \cos\alpha$$

$$M_l = -\frac{1}{2}\rho A_f C_{M_\alpha}(u^2 + w^2)\alpha \quad (\text{II.21})$$

Dengan cara yang sama pada bidang XY yaitu :

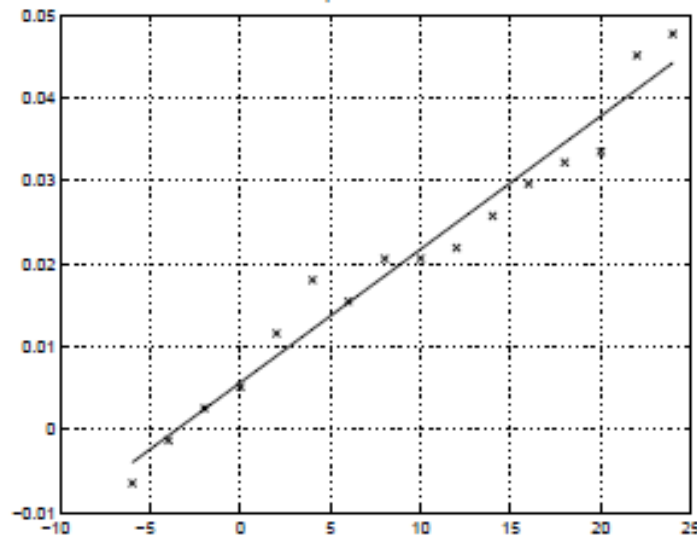
$$Y_l = \frac{1}{2}\rho A_f C_{M_\beta}(u^2 + v^2)\beta \cos\beta$$

$$N_l = \frac{1}{2}\rho A_f C_{M_\beta}(u^2 + v^2)\beta \quad (\text{II.22})$$

Dengan menggunakan persamaan *angle of attack*, dengan asumsi $u \gg w$ atau v , maka:

$$Y_{uv_l} = -Z_{uw_l} = \frac{1}{2}\rho A_f C_{L_\alpha}$$

$$M_{uw_l} = N_{uv_l} = \frac{1}{2}\rho A_f C_{M_\alpha} \quad (\text{II.23})$$



Gambar II.5 Hull Moment: C_m versus α , $V=0.5\text{m/s}$.

(Sumber: *Submarine Dynamic Modeling*)

4. Gaya dan Momen Surface Kontrol

Perlakuan kapal dikontrol oleh 2 bidang horizontal, dan 2 kemudi vertikal. Dengan asumsi diameter sirip bergerak bersama, rumus empiris untuk *lift Fin* adalah :

$$L_{fin} = \frac{1}{2}\rho C_{L_{\delta_f}} S_{fin} \delta_e v_e^2$$

$$M_{fin} = x_{fin} L_{fin} \quad (\text{II.24})$$

Dimana $C_{L\delta f}$ adalah laju perubahan koefisien lift wrt sudut hadap efektif δ_e dan S_{fin} adalah luasan dari δ_e . δ_e adalah sudut δ_e efektif dalam radian. Untuk kemudi $\delta_e = \delta_r + \frac{v+x_{fin}r}{u}$ dan stern plane $\delta_e = \delta_s - \frac{w-x_{fin}q}{u}$. Kecepatan efektif δ_e , $v_e = u$ dan x_{fin} adalah posisi fin pada body terhadap koordinat acuan.

Koefisien di bawah ini memungkinkan kita untuk menghasilkan koefisien hidrodinamika dari persamaan untuk individual lift dan momen fin :

$$\begin{aligned} Y_r &= \frac{1}{2}\rho C_{L\delta f} S_{fin} [u^2 \delta_r + uv + x_{fin}ur] \\ Z_s &= -\frac{1}{2}\rho C_{L\delta f} S_{fin} [u^2 \delta_s + uw + x_{fin}uq] \\ M_s &= -\frac{1}{2}\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} [u^2 \delta_s + uw + x_{fin}uq] \\ N_r &= -\frac{1}{2}\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} [u^2 \delta_r + uv + x_{fin}ur] \end{aligned} \quad (II.25)$$

Akhirnya, kita bisa memecah persamaan II.25 ke dalam bentuk koefisien lift fin berikut:

$$\begin{aligned} Y_{uu\delta r} &= Y_{uvf} = \rho C_{L\delta f} S_{fin} \\ Z_{uu\delta s} &= -Z_{uwf} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} \\ Y_{urf} &= -Z_{uqf} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} \end{aligned} \quad (II.26)$$

Dan koefisien momen fin didapat :

$$\begin{aligned} M_{uu\delta s} &= -M_{uwf} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} \\ N_{uu\delta r} &= N_{uvf} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} \\ M_{uqf} &= N_{urf} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin}^2 \end{aligned} \quad (II.27)$$

5. Gaya dan Momen Propeller

Propeller memberikan gaya X_{prop} dan momen k_{prop} pada sumbu X. Newman[1980] menggunakan non dimensionanal *advance ratio* $J = U/nd$. Dimana U adalah kecepatan, n adalah jumlah putaran poros per satuan waktu dan d adalah diameter propeller. Dia mengasumsikan bahwa, jika tidak ada kavitasi, thrust dan torsi bisa dinondimensionalkan sehingga hanya bergantung pada *advance ratio* dalam bentuk :

$$\left. \begin{aligned} \frac{T}{\rho n^2 d^4} &= K_T(J) \\ \frac{Q}{\rho n^2 d^5} &= K_Q(J) \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} X_{prop} = K_T(J) \rho n^2 d^4 \\ K_{prop} = K_Q(J) \rho n^2 d^5 \end{cases} \quad (II.28)$$

Efisiensi propeller :

$$\eta_p = \frac{UT}{2\pi nQ} = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (II.29)$$

Penjumlahan dari persamaan II.12, II.13, II.18, II.23, II.26, dan II. 27 kita akan mendapatkan gaya hidrodinamika berikut ini:

$$\begin{aligned}
Y_{uv} &= Y_{uv_l} + Y_{uv_f} + Y_{uv_d} & M_{uw} &= M_{uw_\alpha} + M_{uw_f} + M_{uw_l} \\
Y_{ur} &= Y_{ur_\alpha} + Y_{ur_f} & M_{uq} &= M_{uq_\alpha} + M_{uq_f} \\
Z_{uw} &= Z_{uw_l} + Z_{uw_f} + Z_{uw_d} & N_{uv} &= M_{uv_\alpha} + M_{uv_f} + M_{uv_l} \\
Z_{uq} &= Z_{uq_\alpha} + Z_{uq_f} & N_{ur} &= N_{ur_\alpha} + N_{ur_f}
\end{aligned}
\tag{II.30}$$

Dengan menjumlahkan semua gaya dan momen pada kapal selam, maka didapatkan:

$$\begin{aligned}
\sum X_{ext} &= X_{HS} + X_{u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{uv}uv + X_{uw}uw + X_{v|v}|v| + X_{vr}vr + X_{w|w}|w| \\
&\quad + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{rr}rr + X_{prop} \\
\sum Y_{ext} &= Y_{HS} + Y_{uu\delta_r}u^2(\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{v|v}|v| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{wp}wp \\
&\quad + Y_{pq}pq + Y_{\dot{r}}\dot{r} \\
\sum Z_{ext} &= Z_{HS} + Z_{uu\delta_s}u^2(\delta_{s_{top}} + \delta_{s_{bottom}}) + Z_{uw}uw + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{w|w}|w| \\
&\quad + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{rp}rp \\
\sum K_{ext} &= K_{HS} + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{uu\delta_r}(-\delta_{r_{top}} + \delta_{r_{bottom}}) + K_{uu\delta_s}(-\delta_{s_{right}} + \delta_{s_{left}}) + K_{prop} \\
\sum M_{ext} &= M_{HS} + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s + M_{uw}uw + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{rp}rp \\
\sum N_{ext} &= N_{HS} + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r + N_{ur}ur + N_{uv}uv + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{\dot{r}}\dot{r}
\end{aligned}
\tag{II.31}$$

II.2.3 Added Mass

Suatu kendaraan bawah air khususnya dengan gerakan maju, digerakkan oleh propeller atau thruster, yang juga merespon terhadap gaya arus dan gerakan gelombang permukaan yang biasa dikenal dengan *self motion*. *Vice Versa*, fluida di sekeliling kendaraan juga digerakkan oleh gerakan kendaraan. Dengan kata lain permasalahan hidrodinamika dan dinamika dipasangkan. Di samping itu kedua hal tersebut menjadi nonlinier, dimana hal tersebut menjadi suatu tantangan yang cukup sulit untuk dianalisa. Masing – masing dari hidrodinamika dan dinamika kendaraan belum sepenuhnya dapat dimengerti. Oleh karena persoalana tersebut analisa hidrodinamika mendapatkan gerakan spesifik kendaraan seperti boundary condition, sedangkan *rigid body dynamic* analisis mendapatkan gaya hidrodinamika spesifik seperti forcing homogenous term pada persamaan differensial dari gerakan. Efek coupling diabaikan, suatu asumsi dimana sebenarnya berlaku pada suatu kasus seperti difraction gelombang panjang terhadap kendaraan kecil dan sebagainya.

Pada analisa *rigid body dynamic* cocok untuk memiliki persamaan gerakan yang ditulis dalam *body fix coordinate system* sebagai *body* geometri. Gaya hidrodinamika yang bekerja pada kendaraan khusus pada kondisi dari koefisien hidrodinamis. Dengan kata lain sebagai fungsi dari state variable gerakan kendaraan. Dekomposisi dari gaya hidrodinamik dalam bentuk koefisien yang hanya tergantung pada bentuk body saja. Pada banyak pekerjaan dalam maslah hidrodinamika kendaraan, gaya hidrodinamika diasumsikan sebagai suatu prioritas manjadi jumlah linier dari kondisi dimana tergantung dari kecepatan kendaraan, akselerasi dan seterusnya. Dengan msing-masing konjdisi yang disebut hidrodinamik koefisien. Terpisah dimana suatu perhitungan koefisien berdasar pada analisa regresi dari field dan data experimental. Dari sudut pandang statistik, akurasi dan asumsi ini akan tergantung sekali dari ukuran serta range data yang digunakan pada analisa regresi pada study saat ini, tentang stabilitas dan kemampuan manuver kendaraan. Penulis menghitung gaya hidrodinamika menggunakan teori added mass serta dengan rumus boundary integral untuk solusi dari persamaan hidrodinamika. Teori added mass cocok untuk analisa dari stabilitas dinamis kapal selam mini.

Seperti yang terdapat pada buku Thor. I. Fossen. 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicle*, dalam perhitungan estimasi hidrodinamik derivatif terdapat dua cara yaitu:

1. Strip Theory

Metode ini digunakan pada berbagai bentuk geometri. Prinsipnya dengan membagi setiap bagian menjadi strip dalam analisa dua dimensi.

2. Prolate Ellipsoid

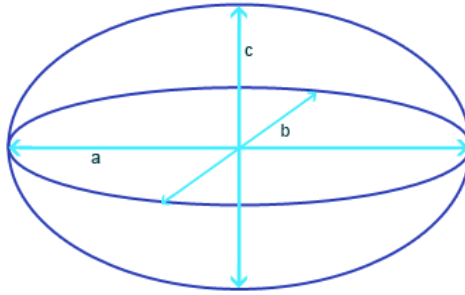
Metode ini digunakan dengan pendekatan geometri dengan bentuk ellipsoid dan metode ini lebih mudah untuk dikerjakan. Berdasarkan total bentuk elips pada pusatnya dapat dideskripsikan sebagai berikut.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (\text{II.32})$$

Dimana a,b,c adalah geometri ellipsoid dengan sumbu a=b dan a>c maka nilai konstanta dapat diketahui dengan persamaan berikut (Imlay, 1961)

$$\begin{aligned} X_{ii} &= -\frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 & Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} &= -\frac{\beta_0}{2-\beta_0} \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \\ K_{\dot{p}} &= 0 & N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}} &= -\frac{1}{5} \frac{(b^2 - a^2)^2 (\alpha_0 - \beta_0)}{2(b^2 - a^2) + (b^2 + a^2)(\beta_0 - \alpha_0)} \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

Sedangkan konstanta α_0 dan β_0 dapat dihitung sebagai berikut



Gambar II.6 Profil *Prolate Ellipsoid*

(Sumber: <http://howimport.890m.com>)

$$e = \sqrt{1 - (b/a)} \quad \alpha_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3} \left(\frac{1}{2} \log \frac{1+e}{1-e} - e \right) \quad \beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3} \log \frac{1+e}{1-e} \quad (\text{II.34})$$

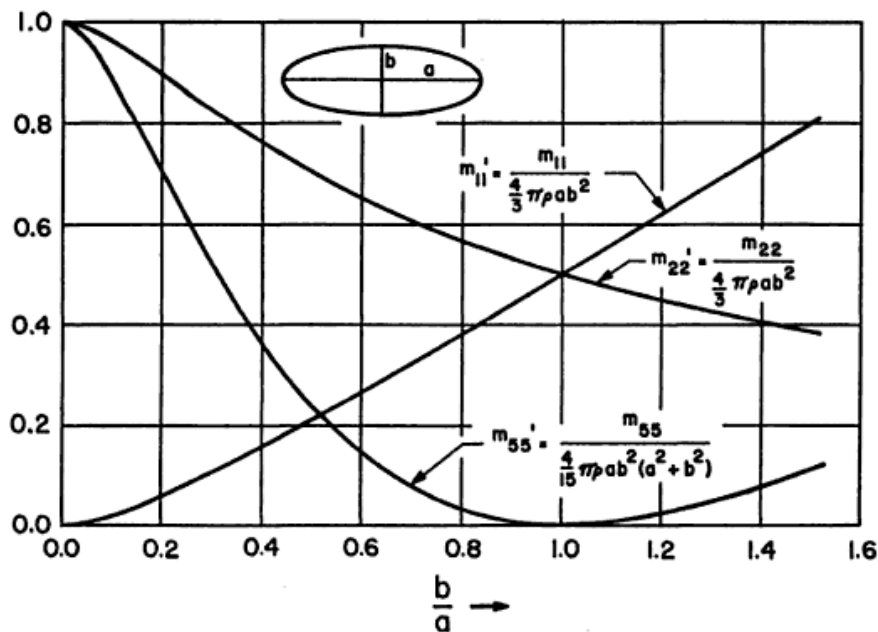
Atau bisa juga dengan menggunakan persamaan *Lamb* (1932) sebagai berikut :

$$k_1 = \frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} \quad k_2 = \frac{\beta_0}{2-\beta_0} \quad k^l = \frac{e^4 (\beta_0 - \alpha_0)}{(2-e^2)[2e^2 - (2-e^2)(\beta_0 - \alpha_0)]} \quad (\text{II.35})$$

Sehingga persamaan *derivative added mass* didapatkan sebagai berikut :

$$X_{\ddot{u}} = -k_1 \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \quad Y_{\ddot{v}} = Z_{\ddot{w}} = -k_2 \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \quad N_{\ddot{r}} = M_{\ddot{q}} = -k^t \frac{4}{15} \pi \rho a b^2 (a^2 + b^2) \quad (\text{II.36})$$

John Nicholas Newman dalam bukunya yang berjudul *Marine Hydrodynamic* menjelaskan bahwa perhitungan 3 koefisien added mass dapat dihitung atas perbandingan nilai b/a yang kemudian dimasukkan ke dalam grafik koefisien added mass. Grafik added mass pada gambar II.7 adalah grafik dari 3 koefisien added mass untuk bentuk ellipsoid.



Gambar II.7. Grafik Added Mass

(Sumber: *Marine Hydrodynamic*)

Grafik tersebut menunjukkan koefisien non dimensional dalam bentuk massa dan momen inersia dari displacement fluida. Pada suatu kondisi dimana $b/a \rightarrow 0$, koefisien added mass secara longitudinal cenderung sama dengan nol dengan analogi terhadap bidang daar yang bergerak pada bidang itu sendiri. Dengan kata lain, batasan yang sesuai untuk koefisien lateral dan momen inersia adalah 1, sesuai prediksi menggunakan *strip theory* dan *added mass of a circular cylinder*. Dengan memperbesar nilai b/a , nilai added mass memanjang menjadi lebih signifikan, sedangkan koefisien added mass secara lateral akan menurun karena efek dari tiga dimensional. Untuk $b/a = 1$ bertepatan dengan bentuk sphere, dimana *translational added mass* sama dengan setengah massa displacement dan koefisien rotasional

II.2.4 Koefisien Hidrodinamika

Berdasarkan uraian di atas, maka koefisien-koefisien hidrodinamika yang akan dicari adalah sebagai berikut.

1. $X_{\dot{u}}$ = Koefisien Added Mass
2. X_{uw} = Koefisien Axial Drag
3. X_{uv} = Koefisien Axial Drag
4. X_{vr} = Koefisien Added Mass Cross Term
5. X_{wq} = Koefisien Added Mass Cross Term
6. X_{rr} = Koefisien added Mass Cross Term
7. $Y_{uu\delta r}$ = Koefisien Fin Lift
8. Y_{uv} = Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9. Y_{ur} = Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10. $Y_{\dot{v}}$ = Koefisien Added Mass
11. Y_{wp} = Koefisien Added Mass Cross Term
12. Y_{pq} = Koefisien Added Mass Cross Term
13. $Y_{\dot{r}}$ = Koefisien Added Mass
14. $Z_{uu\delta s}$ = Koefisien Fin Lift
15. Z_{uw} = Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16. Z_{uq} = Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17. Z_{vp} = Koefisien Added Mass Cross Term
18. $Z_{\dot{w}}$ = Koefisien Added Mass
19. $Z_{\dot{q}}$ = Koefisien Added Mass
20. Z_{rp} = Koefisien Added Mass Cross Term
21. $M_{uu\delta s}$ = Koefisien Fin Moment
22. M_{uw} = Body dan Fin dan Munk Moment
23. M_{uq} = Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24. M_{vp} = Koefisien Added Mass Cross Term
25. $M_{\dot{w}}$ = Koefisien Added Mass
26. $M_{\dot{q}}$ = Koefisien Added Mass
27. $N_{uu\delta r}$ = Koefisien Fin Moment
28. N_{uv} = Body dan Fin dan Munk Moment
29. N_{ur} = Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin

- 30. N_v = Koefisien Added Mass
- 31. N_{wp} = Koefisien Added Mass Cross Term
- 32. N_r = Koefisien Added Mass

II.3 Wind Tunnel Experiments

Wind tunnel (terowongan angin) adalah salah satu alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamik. *Wind tunnel* digunakan untuk mempelajari efek aliran udara yang melewati benda solid. Saat ini pengujian terowongan angin sudah banyak diaplikasikan pada mobil, aerofoil dan benda uji lainnya. Ada dua tipe dasar dari *wind tunnel*, yaitu *Open Circuit Tunnel* dan *Closed Circuit Tunnel*. Sedangkan berdasarkan kecepatan udara, *wind tunnel* dibedakan atas

- a. *Subsonic Wind Tunnel* (Mach number <1)
- b. *Transonic wind tunnel* (Mach number =1)
- c. *Supersonic wind tunnel* (Mach number >1)
- d. *Hypersonic wind tunnel* (Mach number >5)



Gambar II.8 Open Circuit Subsonic Wind Tunnel Teknik Mesin ITS

Percobaan dilakukan dalam sebuah *Open Circuit Tunnel* (*subsonic wind tunnel*), dengan kapasitas kecepatan udara antara 20 Hz sampai 50 Hz Seperti terlihat pada gambar II.8 Terowongan angin tersebut mempunyai ukuran panjang 2980 mm dengan test section berbentuk bujur sangkar berukuran 300 x 300 mm² dan panjang 450 mm. Gaya model layar diukur dengan menggunakan timbangan gaya aerodinamik (*aerodynamic force balance*) yang mempunyai ketelitian sebesar 1 mN.

II.3.1 Jenis-Jenis Wind Tunnel

Wind tunnel atau yang lebih dikenal dengan terowongan angin merupakan peralatan yang banyak digunakan pada dunia aerodinamik atau dalam dunia penerbangan. Terdapat beberapa jenis dari *wind tunnel* (terowongan angin). Penggunaan macam dari *wind tunnel* menyesuaikan dari kebutuhan pengujian, model yang akan diuji serta *output* yang akan dihasilkan dari proses pengujian tersebut. Terdapat dua tipe dari *wind tunnel*, yaitu *Open Circuit Tunnel* dan *Closed Circuit Tunnel*.

- a. Tipe *Open Circuit Tunnel*, merupakan salah satu jenis dari *wind tunnel* yang mana fluida mengalir pada kondisi terbuka (*open circuit*) secara lurus melalui bagian masuk atau yang lebih dikenal dengan kondisi *inlet* kemudian menuju pada bagian model pengujian atau *test section*. Kemudian dari *test section* udara mengalir melalui *fan* dan keluar ke udara bebas/atmosfer. Jadi pada tipe ini udara mengalir secara terus – menerus dari bagian *inlet* menuju *outlet*.



Gambar II.9. Open Circuit Wind Tunnel di ITS

- b. Tipe Closed Tunnel, merupakan salah satu jenis dari *wind tunnel* yang mana fluida mengalir secara terus – menerus dan mengalami sirkulasi secara kontinu dengan sedikit atau tanpa pertukaran udara dengan udara atmosfer. Berbeda dengan tipe open circuit wind tunnel yang mana udara mengalami sirkulasi dengan atmosfer



Gambar II.10 Closed Circuit Wind Tunnel

(Sumber: www.rollinghillsresearch.com)

Kemudian jika dilihat berdasarkan kecepatan udara yang mengalir di dalam *wind tunnel*, maka dapat dibedakan atas :

- a. Subsonic Wind Tunnel ($M < 1$)
- b. Transonic Wind Tunnel ($M = 1$)
- c. Supersonic Wind Tunnel ($1 < M < 3$)
- d. Hypersonic Wind Tunnel ($M > 5$)

II.3.2 Pengukuran Gaya dan Kecepatan

1. Pengukuran Gaya

Pada aeromodeling, gaya aerodinamik dapat muncul sebagai akibat dari aliran udara pada suatu permukaan dari suatu benda seperti pesawat, mobil, kereta api, helicopter. Gaya aerodinamik dapat muncul karena adanya distribusi tekanan yang berbeda – beda pada permukaan dan tegangan geser pada permukaan yang berasal dari efek gesekan fluida yang melawan bidang permukaan benda. Gaya aerodinamik yang terjadi pada benda dapat dibedakan menjadi dua, yaitu gaya hambat aerodinamik (*drag force*) dan gaya angkat aerodinamik (*lift force*). Fungsi utama baik secara analitis maupun eksperimental dalam aerodinamika adalah untuk memprediksi dan mengukur gaya aerodinamik yang terjadi pada suatu benda.

a. Gaya Hambat Aerodinamik (*Drag Force*)

Gaya hambat (*Drag Force*) merupakan komponen yang bekerja pada suatu bodi yang sejajar dengan arah gerakan. Gaya hambat atau *drag* ini merupakan gaya yang menahan

gerakan benda. Gaya hambat yang terjadi pada suatu benda yang berbentuk kotak di dalam aliran fluida dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$F_D = f(l, V, \rho, \mu) \quad (\text{II.37})$$

Dimana :

L = panjang benda (m)

V = kecepatan aliran (m/s)

ρ = massa jenis fluida yang mengalir (kg/m³)

μ = viskositas kinematik fluida yang mengalir (kg/ms)

Besarnya koefisien drag (drag coefficient), C_d dari penampang tiga dimensi dapat dirumuskan :

$$\frac{F_D}{\rho V^2 d^2} = f\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right) \quad (\text{II.38})$$

Besarnya koefisien drag C_d dari penampang tiga dimensi dapat dirumuskan :

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (\text{II.39})$$

dimana A adalah luasan benda

b. Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya angkat merupakan komponen gaya fluida pada suatu bodi yang tegak lurus arah gerakan fluida. Koefisien lift penampang 3D dirumuskan sebagai berikut :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (\text{II.40})$$

Pada pesawat terbang gaya *Lift* ini diharapkan sebesar mungkin, sehingga pada kecepatan dorong yang kecil pesawat dapat terbang pada ketinggian yang lebih tinggi. Pada suatu model sayap pesawat (*aerofoil*) kecepatan udara yang melalui permukaan atas didesain agar lebih tinggi daripada permukaan bawah, sehingga permukaan bawah akan bertekanan positif dan permukaan atas bertekanan negatif. Dari perbedaan tekanan ini akan menimbulkan suatu gaya yang arahnya ke atas yang disebut gaya *lift*, yang dipakai untuk menerbangkan pesawat. Harga C_L dan C_D untuk *aerofoil* merupakan fungsi dari angka Reynolds dan sudut serang (*angle of attack*) α , yaitu sudut antara *chord aerofoil* dengan vector kecepatan *freestream*.

2. Pengukuran Kecepatan

Pada pengujian *wind tunnel* kapal selam mini menggunakan alat ukur yang bernama *force balancing*. Pada pengukuran ini langsung dapat diketahui *Total of Drag Force* dan *Total of Lift Force*. Pada pengukuran ini *Force Balancing* beroperasi layaknya seperti timbangan. Sehingga ketika *wind tunnel* beroperasi pada kecepatan tertentu *Force Balancing* akan mengalami perubahan posisi dari posisi normal, sehingga perlu diseimbangkan dengan menggeser bandul pada timbangan tersebut. Kecepatan untuk model yang sebenarnya adalah 15.433 m/s, 18.006m/s, 20.578m/s, 23.150 m/s dan 25.772 m/s. Setelah dikonversi ke dalam model skala 1:12 pada wind tunnel, maka kecepatannya menjadi 4.455 m/s, 5.198 m/s, 5.940 m/s, 6.683 m/s dan 7.425 m/s.

BAB III

METODOLOGI

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan metode analisis dan percobaan laboratorium. Berikut adalah langkah-langkahnya.

III.1 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan adalah yang berkaitan dengan konsep perhitungan koefisien hidrodinamika. Untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamika, maka variable yang perlu dicari terlebih dahulu adalah koefisien drag C_D dan koefisien lift C_L . Untuk mendapatkan kedua variabel tersebut, maka diperlukan suatu pengujian. Pengujian dilakukan pada *Wind tunnel*. Proses studi literatur dilakukan dengan referensi penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, buku-buku literatur, pencarian lewat internet dan survei langsung kepada pihak laboratorium yang bersangkutan.

III.2 Bahan dan Peralatan

Persiapan model dilakukan dengan pembuatan model dengan bantuan *software* Maxsurf dan AutoCAD. Dalam model kapal selam mini mempunyai dimensi dengan panjang 6000 mm, lebar = 533 mm, tinggi = 533 mm. Kemudian dari model tersebut divariasikan menjadi bentuk *barehull* seperti pada gambar III.2 dan penambahan *fin* seperti pada gambar III.3. Pada pengujian model di *Wind Tunnel Experiments* dilakukan skala model 1:12 untuk model 3D. Masing-masing variasi bentuk tersebut kemudian diuji dengan variasi 5 kecepatan yaitu 4.455 m/s, 5.198 m/s, 5.940 m/s, 6.683 m/s dan 7.425 m/s dan 4 variasi sudut seperti yang ditunjukkan pada gambar III.4 hingga III.7 yaitu 0°, 10°, 16° dan 20°. Besar sudut yang digunakan mengacu pada bidang horizontal xy ke arah sumbu $-y$.

Menurut teori *blockage ratio* bahwa luasan model sebaiknya kurang dari 10% luasan dari *test section wind tunnel* (AT) untuk menghindari efek dinding yang disebabkan oleh *boundary layer* pada dinding *wind tunnel*, maka luasan penampang *frontal* model harus lebih kecil dari $AT = (300 \times 300) \text{ mm}^2$.

Tabel III.1 Dimensi Utama kapal Selam Mini

Dimensi	Kapal Selam Mini	Model	
Panjang	6.0 m	0.50 m	500 mm
Tinggi	0.533 m	0.044 m	44 mm
Lebar	0.533 m	0.044 m	44 mm
Luas	0.284 m ²	0.0019 m ²	1936 mm ²

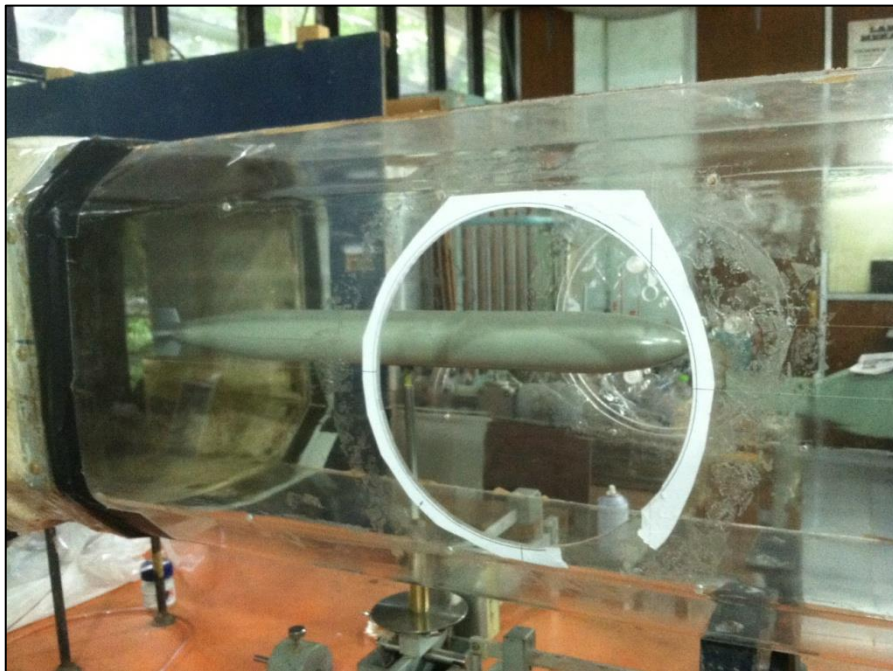
A (luasan *frontal* model) = 1936 mm² (2.15% dari luasan A_T). Sehingga luasan A memenuhi batas 10% *blockage ratio* dari luasan *test section* $A_T = 90000 \text{ mm}^2$. Sedangkan bahan model terbuat dari paralon (PVC) dengan variasi *barehull*, *fin*, sudut dan kecepatan. Pengujian dilakukan pada terowongan angin (*wind tunnel*) seperti yang ditunjukkan pada gambar III.1.



Gambar III.1. Wind Tunnel dengan Force Balancing Method



Gambar III.2 Variasi Barehull



Gambar III.3 Variasi Fin



Gambar III.4 Variasi Sudut 0°



Gambar III.5 Variasi Sudut 10°



Gambar III.6 Variasi Sudut 16°

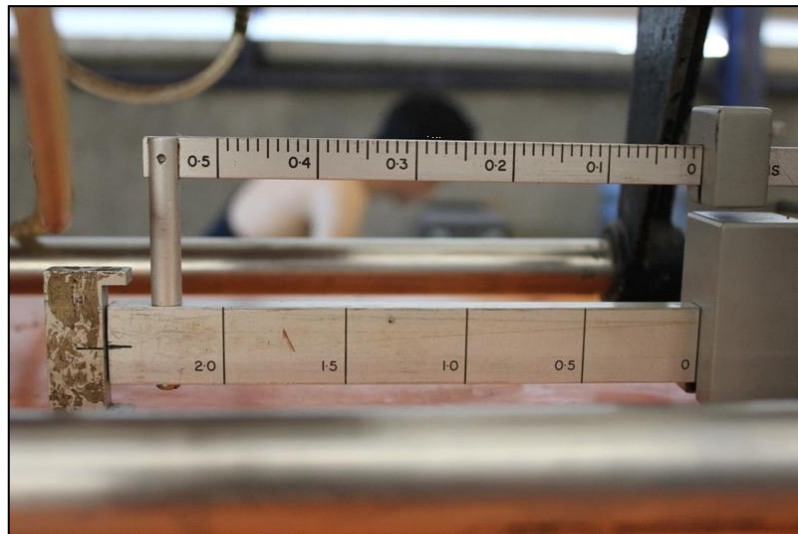


Gambar III.7 Variasi Sudut 20°

III.3 Proses Pengerjaan

Langkah – langkah yang dilakukan dalam melakukan pengujian menggunakan *wind tunnel* adalah sebagai berikut

- a. Menentukan kecepatan *freestream* yang diinginkan pada *test section*. Dalam hal ini kecepatan *freestream* adalah 4.455 m/s, 5.198 m/s, 5.940, 6.683 m/s dan 7.425 m/s.
- b. Menentukan sudut angle of attack yaitu sebesar 0° , 10° , 16° , dan 20°
- c. Melakukan persiapan terhadap *test section* sehingga tidak terjadi masalah ketika proses running berlangsung misalnya dengan membersihkan debu dan kotoran-kotoran yang menempel pada *test section*.
- d. Menyiapkan model uji kapal selam mini dengan variasi bare hull dan fin, kemudian dipasangkan pada *force balancing*.
- e. Melakukan penyebaran berat pada kapal selam mini sehingga posisi model uji berada pada keadaan normal, dengan posisi *drag* dan *lift* nol pada indikator *drag force* dan *lift force* sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar III.8 dan III.9.

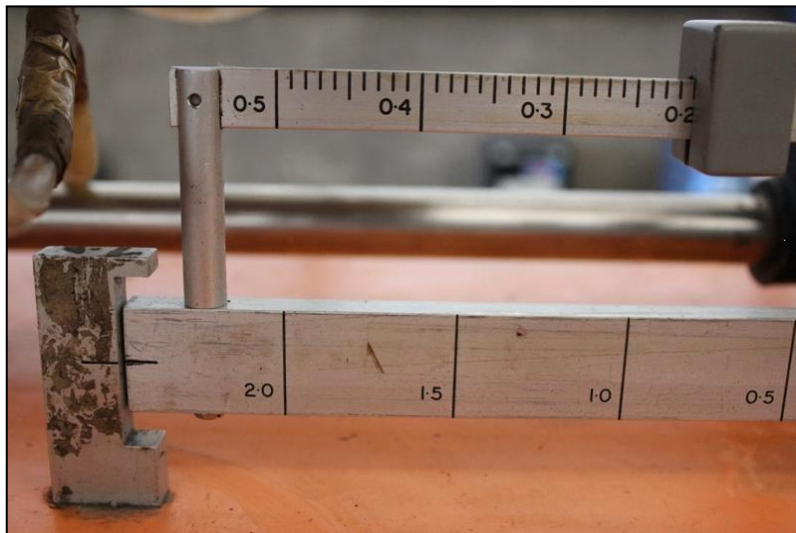


Gambar III.8 Indikator Drag Force pada proses Pengujian



Gambar III.9 Indikator Lift Force pada proses Pengujian

- f. Menentukan kecepatan *free stream* pada wind tunnel dengan menentukan frekuensi pada inverter sehingga dihasilkan kecepatan yang diinginkan.
- g. Melakukan pengukuran gaya yang diterima pada model uji sehingga diketahui total *drag force* dan *lift force*. Pengukuran gaya dapat dilakukan apabila indikator garis pada alat tersebut sudah dalam keadaan sejajar. Kondisi sejajar ini dapat diperoleh dengan menggeser beban balok kecil. Sebagai contoh pada gambar III.10 didapatkan nilai gaya drag sebesar 0.2 N



Gambar III.10 Pengukuran Drag Force

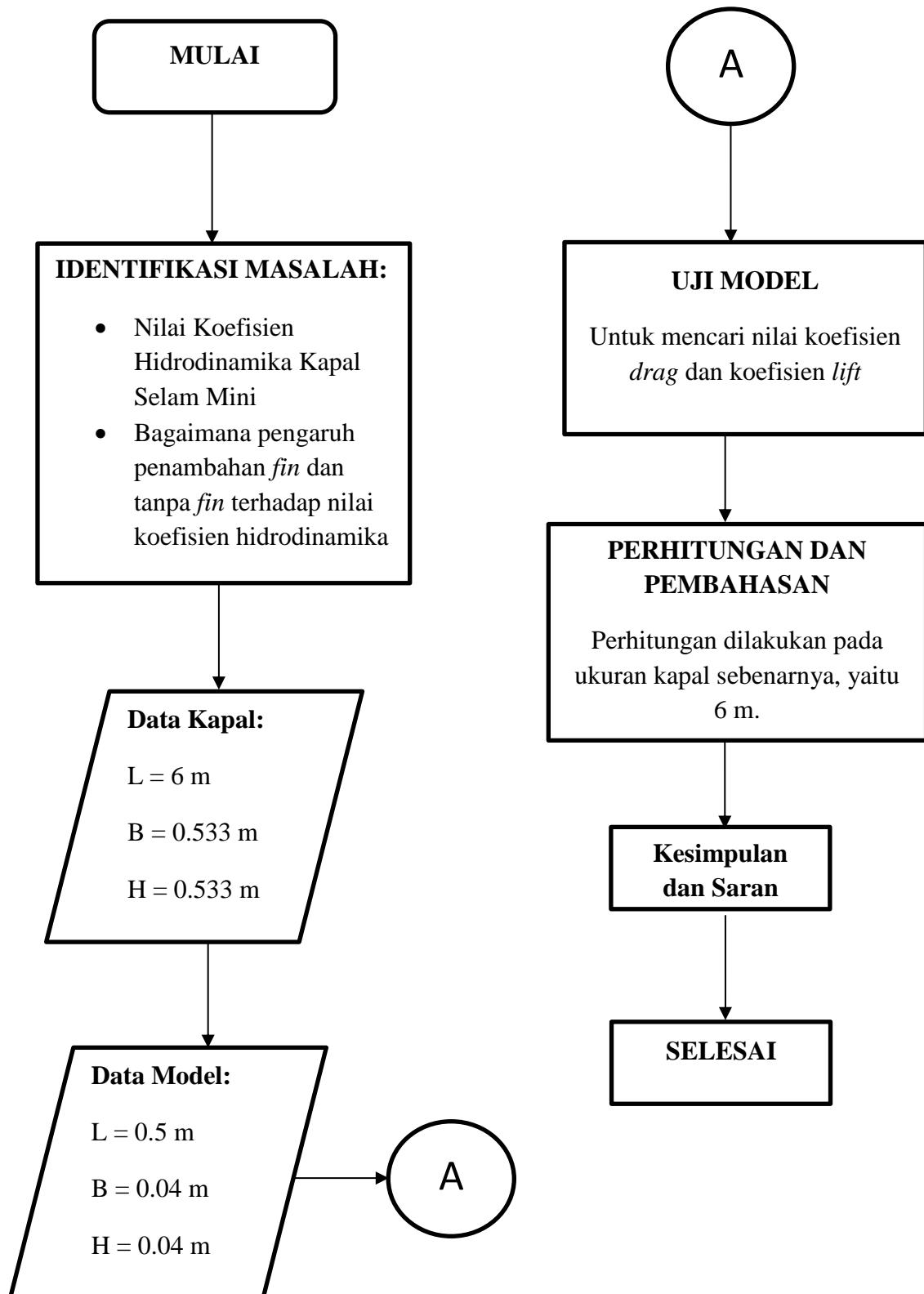
- h. Untuk setiap model uji dilakukan pengambilan data sebanyak 3 kali percobaan untuk mendapatkan total drag force kemudian dihitung nilai rata-rata dari 3 kali pengambilan data
- i. Menganalisis dari data yang diperoleh kemudian mencari harga total dari *drag force* dan *lift force*

III.4 Lokasi Pengerjaan

Pengujian model kapal selam mini dilakukan pada Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida Teknik Mesin FTI – ITS. Dimana terdapat 2 metode yang dapat dilakukan pada Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida ITS yaitu dengan metode *Force Balancing* dan *Pressure Tab*. Pada pengujian ini dengan mempertimbangkan masalah waktu dan segi biaya metode *Force Balancing* sangat sesuai untuk dilakukan pada pengujian model kapal selam mini. Kemudian sebelum dilakukan pembuatan model dan pengujian pada *Wind Tunnel* dilakukan observasi mengenai peralatan pada *Wind Tunnel* yang akan digunakan untuk mendapatkan skala model yang sesuai agar tidak terjadi *blocking* pada aliran yang dihasilkan pada *Wind Tunnel* yang dikarenakan oleh ukuran model yang terlampau besar dibandingkan dengan *test section*.

Pada proses pembuatan model dengan bantuan dari pihak laboratorium. Model kapal selam mini ini terbuat dari bahan paralon (PVC). Pada pengujian yang dilakukan akan diperoleh *drag* total dan *Lift* total dari model pengujian. Hasil yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan koefisien *drag* dan *lift*.

III.5 Bagan Alir



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL PERCOBAAN

IV.1 Data Eksperimen Wind Tunnel

Hasil data eksperimen pada *wind tunnel* akan dijelaskan sebagai berikut.

IV.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

a. Viskositas Udara

Untuk perhitungan viskositas udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu :

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S+T} \quad (\text{IV.1})$$

Dimana untuk udara :

$$b = 1.458 \times 10^{-6}$$

$$S = 110.4$$

$$T = \text{temperature}$$

Dari nilai-nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (IV.1) sehingga didapatkan :

$$\mu = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times 304^{\frac{3}{2}}}{110.4 + 304}$$
$$\mu = 1.865 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}^2$$

b. Bilangan Reynolds (Re)

Perhitungan bilangan reynolds didasarkan pada panjang kapal selam mini, kemudian bilangan reynolds dapat diselesaikan dengan persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (\text{IV2})$$

Dimana :

$$\rho = \text{Massa Jenis Fluida} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \text{Viskositas Udara} = 1.865 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}^2$$

$$L = \text{Panjang kapal}$$

$$V = \text{Kecepatan freestream}$$

IV.1.2 Pengukuran Drag Force dan Lift Force

Drag Force dan *Lift Force* diukur dengan timbangan gaya yang terdapat pada *wind tunnel*. Pengukuran dilakukan dengan pengambilan 3 kali pengujian pada 5 variasi kecepatan, 3 variasi sudut dan variasi barehull dan fin dari model pengujian. Kemudian dari 3 kali pengujian diambil rata – rata dari pengambilan data tersebut. Rekapitulasi dari nilai rata – rata dalam pengujian dimasukkan pada Tabel. Dari data pengujian maka dapat ditentukan pula koefisien total dari hambatan pada kapal selam mini sebagai berikut

a. Variasi Barehull

Pengukuran gaya dilakukan dengan menggeser beban pada *force balancing* agar berada dalam keadaan seimbang. Nilai-nilai gaya drag dan *lift* dicatat dan digunakan untuk menghitung besarnya koefisien drag dan koefisien *lift*. Tabel IV.1 menunjukkan hasil rekapitulasi dari gaya drag, gaya lift, koefisien drag dan koefisien lift untuk sudut 0° . sedangkan untuk sudut 10° , 16° dan 20° masing-masing tercantum dalam table IV.2, IV.3 dan IV.4. Nilai-nilai koefisien drag dan lift kemudian diplot dalam satu grafik sebagai fungsi dari sudut untuk masing-masing kecepatan. Grafik tersebut bisa dilihat pada gambar IV.1 sampai gambar IV.5 untuk kecepatan masing-masing sebesar 4.455 m/s, 5.198 m/s, 5.940 m/s, 6.683 m/s dan 7.425 m/s.

Tabel IV.1 Drag Force, Lift Force, C_d dan C_L Variasi Barehull sudut 0°

NO	Re	Kecepatan (m/s)	$R_{D,udara}$ (N)	$R_{D,air}$ (N)	$C_{D,air}$	$R_{L,udara}$ (N)	$R_{L,air}$ (N)	$C_{L,air}$
1	140935.7	4,455	0,026	2,6	0,00430	-	-	-
2	164440.8	5,198	0,035	3,5	0,00425	-	-	-
3	187914.2	5,940	0,046	4,6	0,00427	-	-	-
4	211419.3	6,683	0,058	5,8	0,00426	-	-	-
5	234892.8	7,425	0,069	6,9	0,00410	-	-	-

Tabel IV.2 Force, Lift Force, C_d dan C_L Variasi Barehull sudut 10°

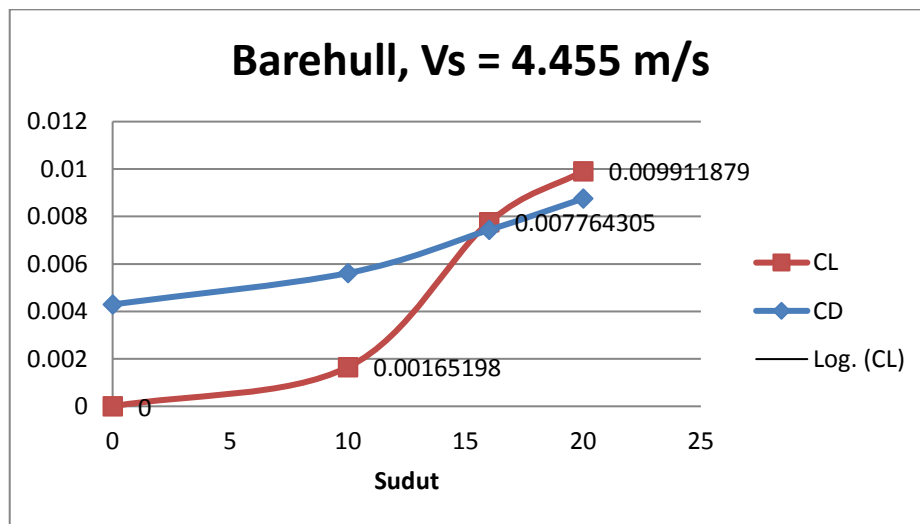
NO	Re	Kecepatan (m/s)	$R_{D,udara}$ (N)	$R_{D,air}$ (N)	$C_{D,air}$	$R_{L,udara}$ (N)	$R_{L,air}$ (N)	$C_{L,air}$
1	140935.7	4,455	0,034	3,4	0,00562	0,01	1	0,00165
2	164440.8	5,198	0,045	4,5	0,00546	0,02	2	0,00243
3	187914.2	5,940	0,057	5,7	0,00530	0,03	3	0,00279
4	211419.3	6,683	0,07	7	0,00514	0,04	4	0,00294
5	234892.8	7,425	0,086	8,6	0,00511	0,05	5	0,00297

Tabel IV.3 Force, Lift Force, Cd dan CL Varisasi Barehull sudut 16 °

NO	Re	Kecepatan (m/s)	R _{D.udara} (N)	R _{D.air} (N)	C _{D.air}	R _{L.udara} (N)	R _{L.air} (N)	C _{L.air}
1	140935.7	4,455	0,045	4,500	0,00743	0,047	4,700	0,00776
2	164440.8	5,198	0,062	6,200	0,00752	0,07	7,000	0,00849
3	187914.2	5,940	0,082	8,200	0,00762	0,09	9,000	0,00836
4	211419.3	6,683	0,102	10,200	0,00749	0,11	11,000	0,00808
5	234892.8	7,425	0,123	12,300	0,00731	0,14	14,000	0,00833

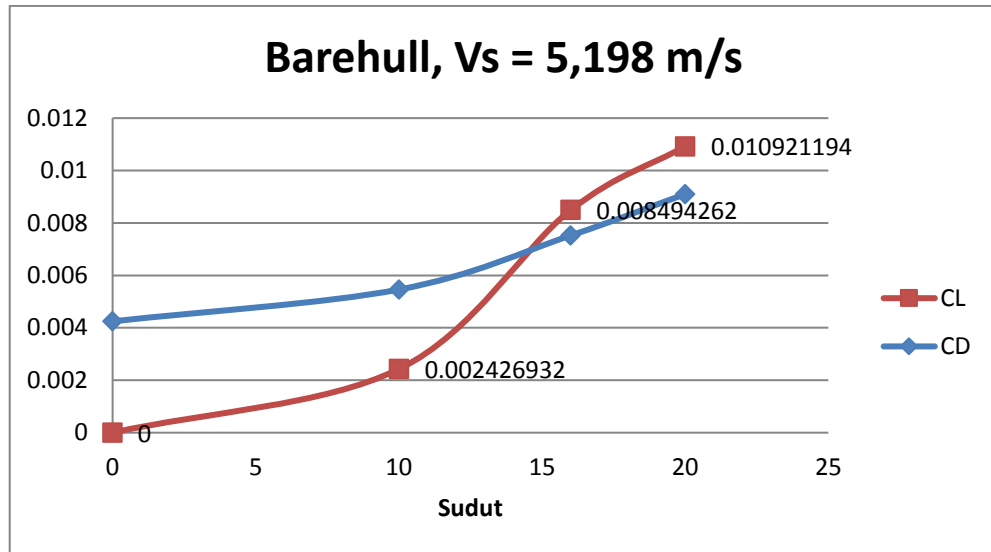
Tabel IV.4 Drag Force, Lift Force, Cd dan CL Varisasi Barehull sudut 20 °

NO	Re	Kecepatan (m/s)	R _{D.udara} (N)	R _{D.air} (N)	C _{D.air}	R _{L.udara} (N)	R _{L.air} (N)	C _{L.air}
1	140935.7	4,455	0,053	5,300	0,00876	0,060	6,000	0,00991
2	164440.8	5,198	0,075	7,500	0,00910	0,090	9,000	0,01092
3	187914.2	5,940	0,097	9,700	0,00901	0,120	12,000	0,01115
4	211419.3	6,683	0,118	11,800	0,00866	0,150	15,000	0,01101
5	234892.8	7,425	0,148	14,800	0,00880	0,193	19,300	0,01148



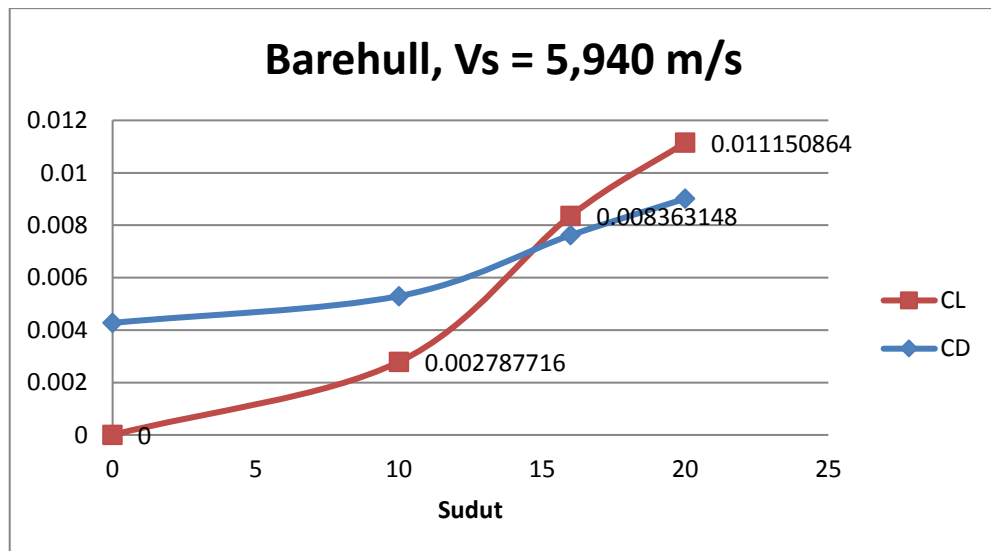
Gambar IV.1 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada Vs = 4.455 m/s

Gambar IV.1 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *barehull* pada kecepatan 4.455 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



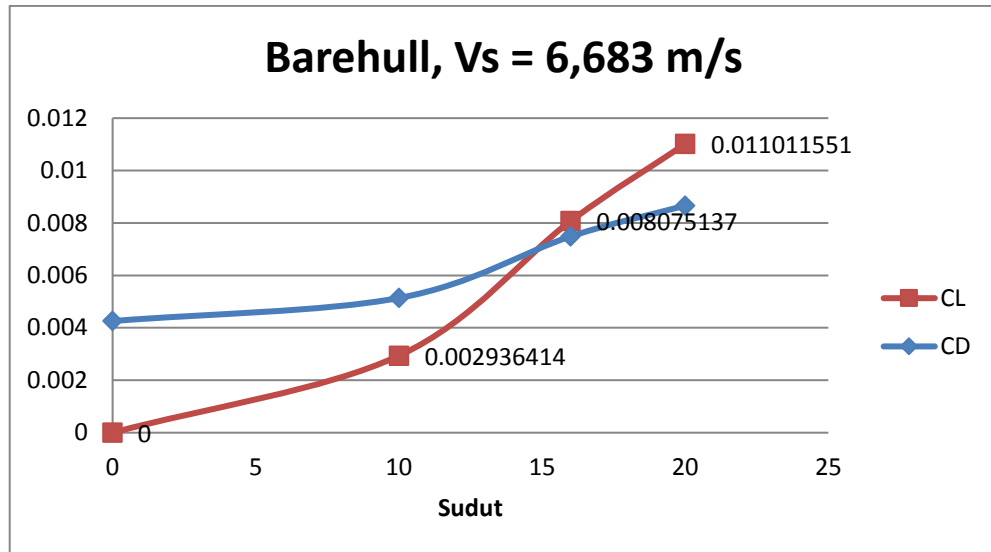
Gambar IV.2 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 5.198$ m/s

Gambar IV.2 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *barehull* pada kecepatan 5.198 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



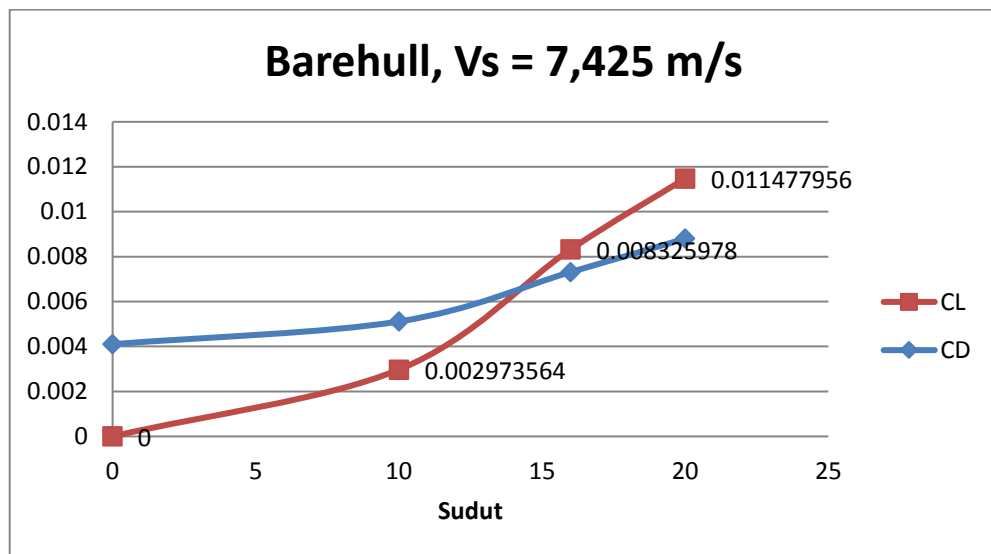
Gambar IV.3 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 5.940$ m/s

Gambar IV.3 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *barehull* pada kecepatan 5.940 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



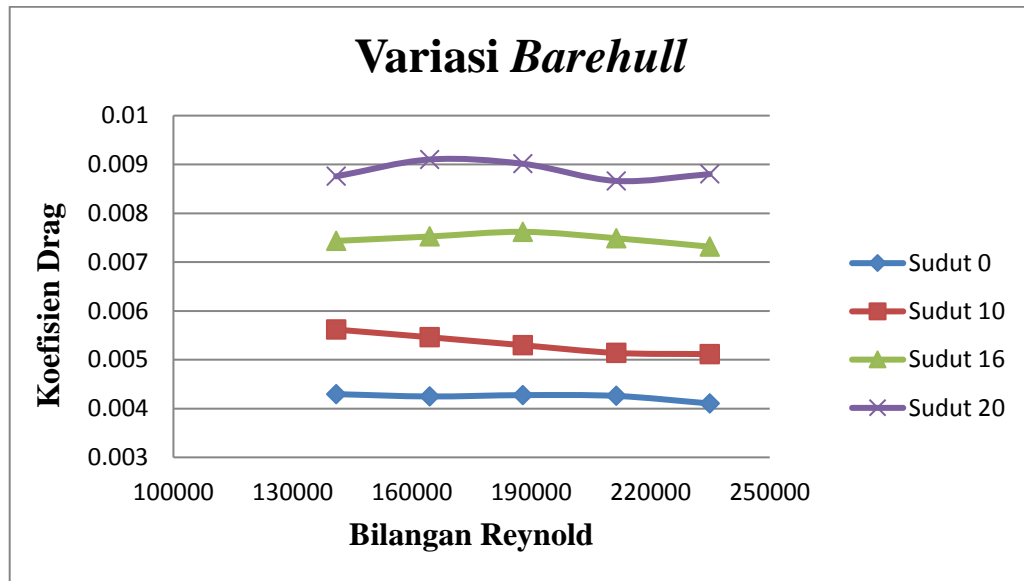
Gambar IV.4 Grafik Koefisien Drag dan Lift pada $V_s = 6.683 \text{ m/s}$

Gambar IV.4 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *barehull* pada kecepatan 6.683 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



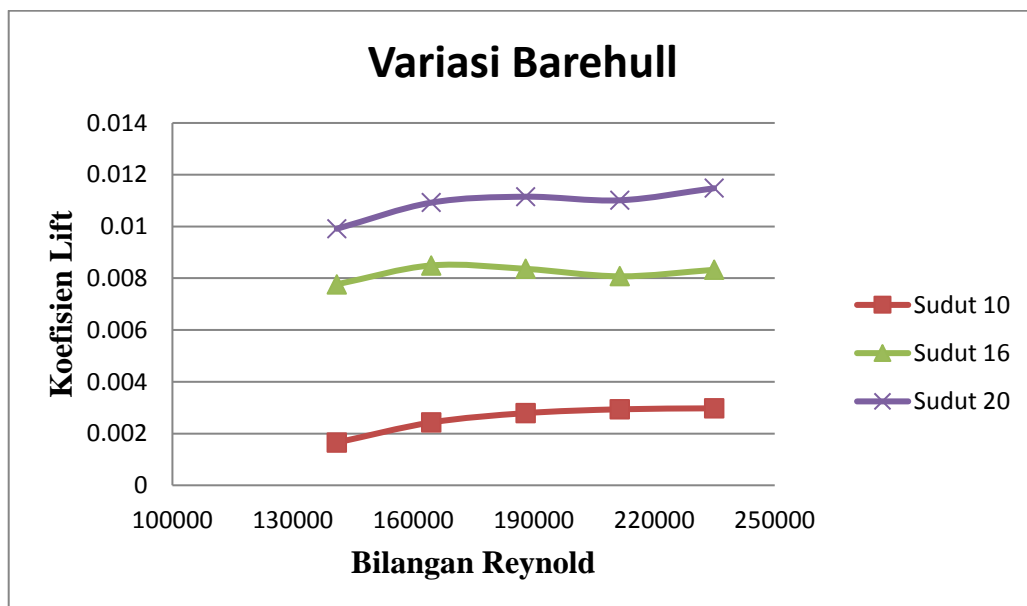
Gambar IV.5 Grafik Koefisien Drag Lift pada $V_s = 7.425 \text{ m/s}$

Gambar IV.5 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *barehull* pada kecepatan 7.425 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



Gambar IV.6 Grafik Koefisien Drag Terhadap Bilangan Reynold

Gambar IV.6 menunjukkan nilai koefisien drag untuk masing-masing sudut yang diplot terhadap Bilangan Reynold. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa besarnya nilai koefisien drag selalu berubah-ubah terhadap nilai bilangan reynold. Semakin tinggi nilai bilangan reynold, nilai koefisien drag belum tentu tinggi dan belum tentu pula semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien drag tidak bergantung pada bilangan reynold.



Gambar IV.7 Grafik Koefisien Lift Terhadap Bilangan Reynold

Gambar IV.7 menunjukkan nilai koefisien lift untuk masing-masing sudut yang diplot terhadap Bilangan Reynold. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa besarnya nilai koefisien lift selalu berubah-ubah terhadap nilai bilangan reynold. Semakin tinggi nilai bilangan reynold, nilai koefisien lift belum tentu tinggi dan belum tentu pula semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien drag tidak bergantung pada bilangan reynold

b. Variasi Fin

Pengukuran gaya dilakukan dengan menggeser beban pada *force balancing* agar berada dalam keadaan seimbang. Nilai-nilai gaya drag dan *lift* dicatat dan digunakan untuk menghitung besarnya koefisien drag dan koefisien *lift*. Tabel 6 menunjukkan hasil rekapitulasi dari gaya drag, gaya lift, koefisien drag dan koefisien lift untuk sudut 0° . sedangkan untuk sudut 10° , 16° dan 20° masing-masing tercantum dalam table 7, 8 dan 9. Nilai-nilai koefisien drag dan lift kemudian diplot dalam satu grafik sebagai fungsi dari sudut untuk masing-masing kecepatan. Grafik tersebut bias dilihat pada gambar 26 sampai gambar 30 untuk kecepatan masing-masing sebesar 4.455 m/s, 5.198 m/s, 5.940 m/s, 6.683 m/s dan 7.425 m/s.

Tabel IV.5 Drag Force, Lift Force, C_d dan C_L Varisasi Fin sudut 0°

NO	Re	Kecepatan (m/s)	$R_{D,udara}$ (N)	$R_{D,air}$ (N)	$C_{D,air}$	$R_{L,udara}$ (N)	$R_{L,air}$ (N)	$C_{L,air}$
1	140935.7	4,455	0,030	3,000	0,00438	-	-	-
2	164440.8	5,198	0,042	4,200	0,00451	-	-	-
3	187914.2	5,940	0,050	5,000	0,00411	-	-	-
4	211419.3	6,683	0,063	6,300	0,00409	-	-	-
5	234892.8	7,425	0,080	8,000	0,00421	-	-	-

Tabel IV.6 Drag Force, Lift Force, C_d dan C_L Varisasi Fin sudut 10°

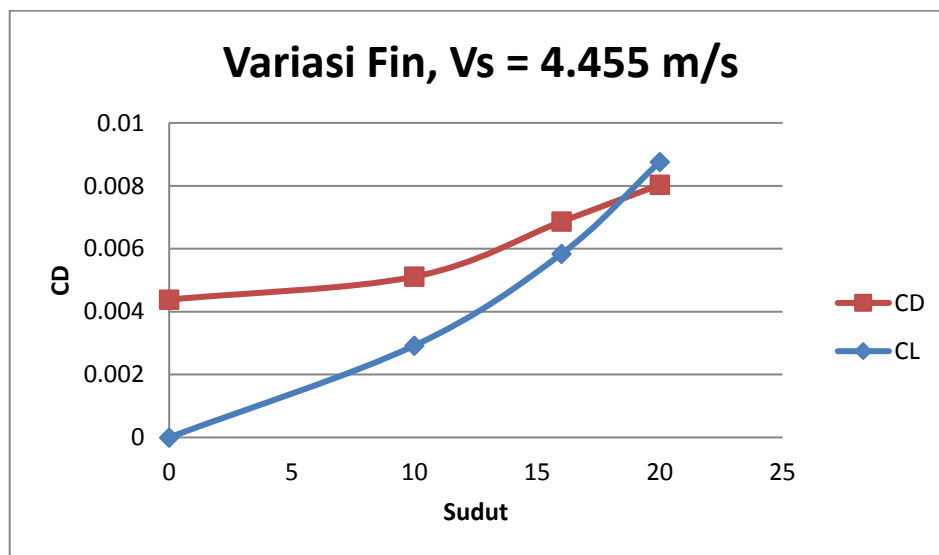
NO	Re	Kecepatan (m/s)	$R_{D,udara}$ (N)	$R_{D,air}$ (N)	$C_{D,air}$	$R_{L,udara}$ (N)	$R_{L,air}$ (N)	$C_{L,air}$
1	140935.7	4,455	0,035	3,5	0,00511	0,02	2	0,00292
2	164440.8	5,198	0,047	4,7	0,00504	0,03	3	0,00322
3	187914.2	5,940	0,06	6	0,00493	0,04	4	0,00329
4	211419.3	6,683	0,073	7,3	0,00474	0,05	5	0,00324
5	234892.8	7,425	0,085	8,5	0,00447	0,06	6	0,00315

Tabel IV.7 Drag Force, Lift Force, C_d dan C_L Varisasi Fin sudut 16°

NO	Re	Kecepatan (m/s)	$R_{D,udara}$ (N)	$R_{D,air}$ (N)	$C_{D,air}$	$R_{L,udara}$ (N)	$R_{L,air}$ (N)	$C_{L,air}$
1	140935.7	4,455	0,047	4,700	0,00686	0,040	4,000	0,00584
2	164440.8	5,198	0,062	6,200	0,00665	0,060	6,000	0,00644
3	187914.2	5,940	0,08	8,000	0,00657	0,080	8,000	0,00657
4	211419.3	6,683	0,1	10,000	0,00649	0,100	10,000	0,00649
5	234892.8	7,425	0,12	12,000	0,00631	0,130	13,000	0,00683

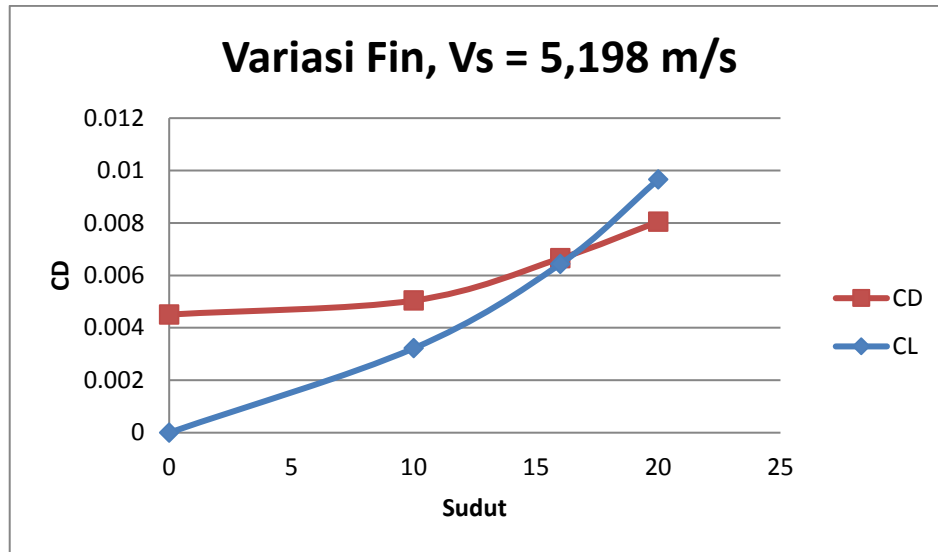
Tabel IV.8 Drag Force, Lift Force, C_d dan C_L Varisasi Fin sudut 20°

NO	Re	Kecepatan (m/s)	$R_{D,udara}$ (N)	$R_{D,air}$ (N)	$C_{D,air}$	$R_{L,udara}$ (N)	$R_{L,air}$ (N)	$C_{L,air}$
1	140935.7	4,455	0,055	5,5	0,00803	0,06	6	0,00876
2	164440.8	5,198	0,075	7,5	0,00805	0,09	9	0,00965
3	187914.2	5,940	0,095	9,5	0,00780	0,12	12	0,00986
4	211419.3	6,683	0,12	12	0,00779	0,15	15	0,00973
5	234892.8	7,425	0,145	14,5	0,00762	0,19	19	0,00999



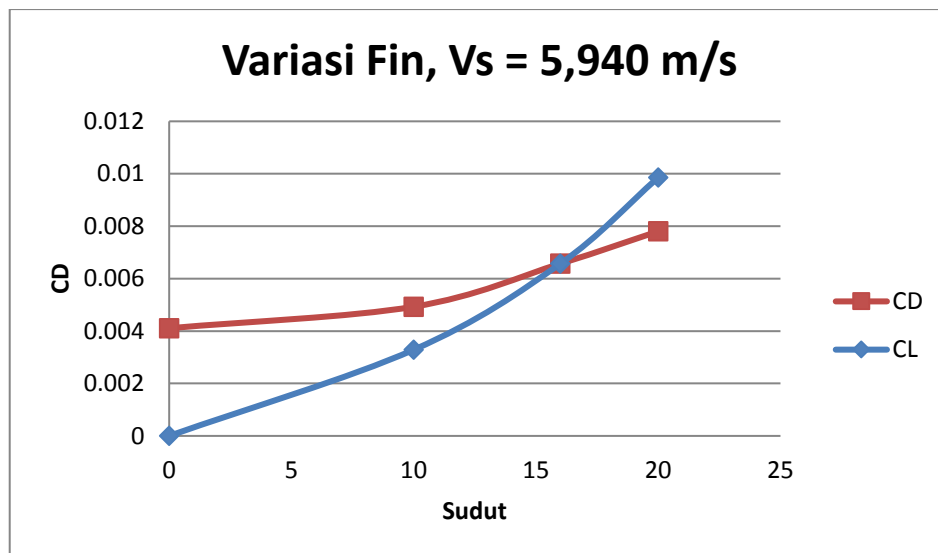
Gambar IV.8 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 4.455$ m/s

Gambar IV.8 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *fin* pada kecepatan 4.455 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



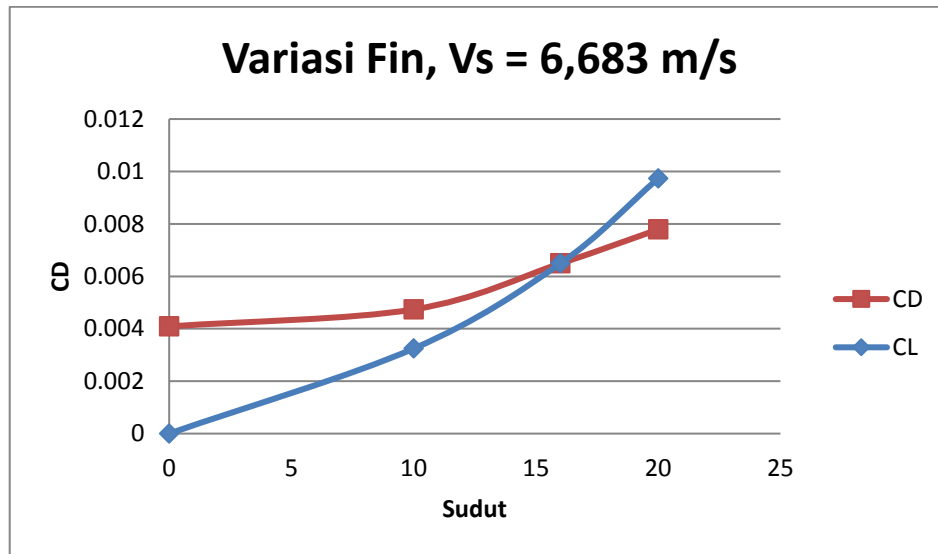
Gambar IV.9 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 5.198 \text{ m/s}$

Gambar IV.9 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *fin* pada kecepatan 5.198 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



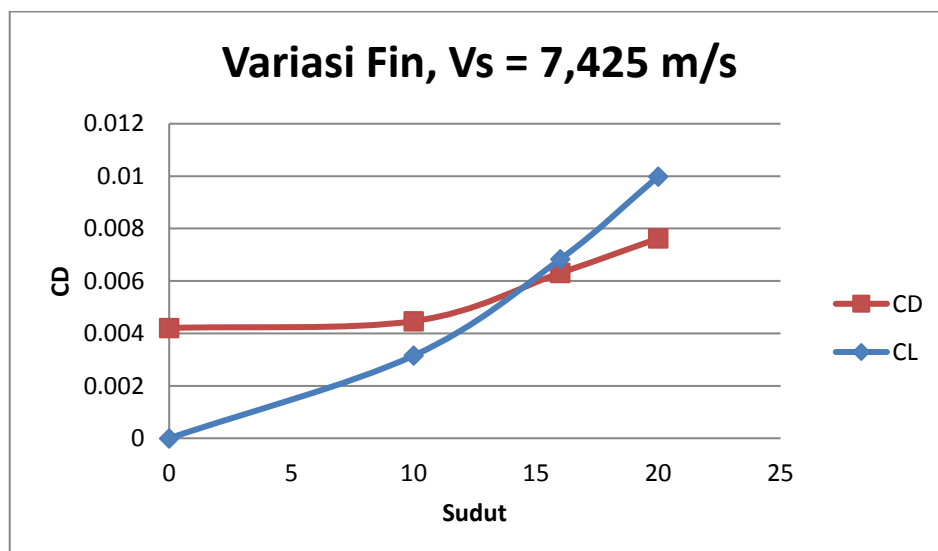
Gambar IV.10 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 5.940 \text{ m/s}$

Gambar IV.1 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *fin* pada kecepatan 5.940 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



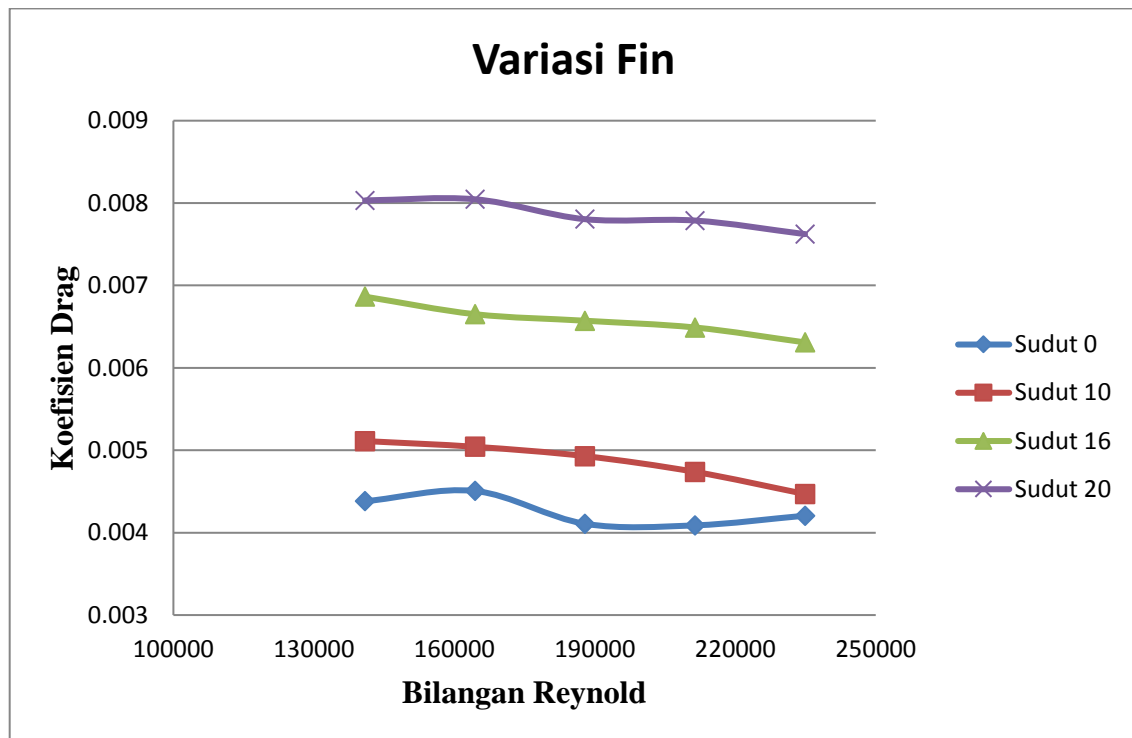
Gambar IV.11 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 6.683 \text{ m/s}$

Gambar IV.1 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *fin* pada kecepatan 6.683 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



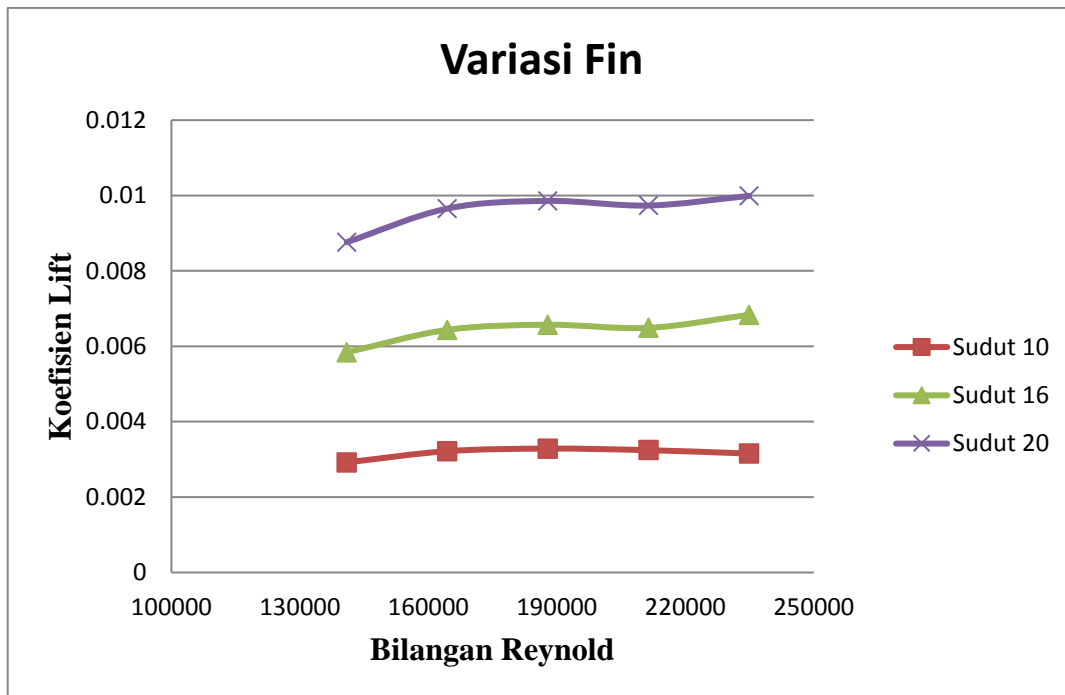
Gambar IV.12 Grafik Koefisien Drag dan Lift Variasi Fin pada $V_s = 7.425 \text{ m/s}$

Gambar IV.1 menunjukkan grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada kapal selama variasi *fin* pada kecepatan 7.425 m/s. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai koefisien *drag* dan *lift* semakin tinggi seiring dengan besarnya sudut. Nilai koefisien *lift* yang semakin membesar menunjukkan bahwa pada kondisi ini kapal belum mencapai titik *stall*.



Gambar IV.13 Grafik Koefisien Drag Terhadap Bilangan Reynold

Gambar di atas menunjukkan nilai koefisien drag untuk masing-masing sudut yang di-*plot* terhadap Bilangan Reynold. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa besarnya nilai koefisien drag selalu berubah-ubah terhadap nilai bilangan reynold. Semakin tinggi nilai bilangan reynold, nilai koefisien drag belum tentu tinggi dan belum tentu pula semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien drag tidak bergantung pada bilangan reynold.



Gambar IV.14 Grafik Koefisien Lift Terhadap Bilangan Reynold

Gambar di atas menunjukkan nilai koefisien lift untuk masing-masing sudut yang di-plot terhadap Bilangan Reynold. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa besarnya nilai koefisien lift selalu berubah-ubah terhadap nilai bilangan reynold. Semakin tinggi nilai bilangan reynold, nilai koefisien lift belum tentu tinggi dan belum tentu pula semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai koefisien lift tidak bergantung pada bilangan reynold.

IV.2 Blockage Effect Ratio

Pada eksperimen-eksperimen yang dilakukan di *wind tunnel*, adalah sangat penting untuk meletakkan model uji pada daerah *freestream*, yaitu di daerah yang sudah tidak dipengaruhi oleh efek dinding. Hal ini dikarenakan pengaruh dari dinding dapat menimbulkan perbedaan pengukuran terhadap karakteristik aliran pada model uji. Nilai *blockage ratio* yang diijinkan di dalam wind tunnel sebesar $d/D \approx 3\%$, dimana d adalah diameter model, sedangkan D adalah lebar test section wind tunnel. Dengan ukuran tersebut diharapkan bahwa efek dinding terhadap model bisa diabaikan. Pada kenyataannya dilapangan pembatasan nilai $d/D < 3\%$ sulit diterapkan, karena keterbatasan ukuran test section dari wind tunnel yang ada. Dengan nilai *blockage ratio* yang kecil diharapkan bahwa efek dinding terhadap model bisa diabaikan. Nilai koefisien drag harus dikoreksi akibat efek dari dinding.

Maskell [9], dalam percobaannya telah menurunkan persamaa koreksi yang dilakukan pada plat tipis yang diletakkan di tengah *test section*. Teorinya didasarkan pada prinsip keseimbangan momentum. Prosedurnya dilakukan akibat adanya efek yang disebabkan oleh aliran fluida dan tekanannya diasumsikan seragam. Dengan percobaan ini ia merumuskan persamaan untuk menghitung *blockage correction* untuk plat tipis yaitu sebagai berikut.

$$\psi = \frac{C_D}{C_{DC}} = 1 + (\phi C_D \frac{A_m}{A_w}) \quad (IV.1)$$

Dimana :

ψ : Faktor Koreksi

C_D : Koefisien Drag

C_{DC} : Koefisien Drag Terkoreksi

ϕ : Blockage Ratio dalam 2 dimensi wind tunnel

A_m : Luasan Frontal Model

A_w : Luasan Frontal Wind Tunnel

Nilai ϕ dapat dihitung dengan menentukan rasio antara tinggi model dengan tinggi *test section*. Diketahui bahwa tinggi model adalah 0.044 meter dan tinggi *test section* adalah 0.3 meter. Maka nilai $\phi = 0.044/0.3 = 0.147$. Sedangkan nilai $A_m/A_w = 0.002/0.09 = 0.022$. Dengan data-data tersebut, maka nilai faktor koreksi dapat dihitung. Setelah nilai faktor koreksi didapat, maka nilai koefisien drag terkoreksi dapat dihitung pula.

Tabel IV.9. Koreksi CD pada variasi Barehull

Speed	Drag Coefficient				Lift Coefficient			
(m/s)	0 deg	10 deg	16 deg	20 deg	0 deg	10 deg	16 deg	20 deg
4,455	0,0043	0,0056	0,0074	0,0088	-	0,0017	0,0078	0,0099
5,198	0,0042	0,0055	0,0075	0,0091	-	0,0024	0,0085	0,0109
5,94	0,0043	0,0053	0,0076	0,0090	-	0,0028	0,0084	0,0112
6,683	0,0043	0,0051	0,0075	0,0087	-	0,0029	0,0081	0,0110
7,425	0,0041	0,0051	0,0073	0,0088	-	0,0030	0,0083	0,0115

Akibat adanya *blockage effect ratio* maka nilai koefisien drag akan terkoreksi. Besarnya nilai yang terkoreksi tergantung dari factor *blockage correction*. Sedangkan factor

ini tergantung terhadap *blockage ratio* (ϕ rasio antara luasan frontal model dengan wind tunnel dan nilai koefisien drag. Tabel IV.9 merupakan hasil perhitungan dari nilai CD yang terkoreksi akibat adanya *blockage effect ratio* pada variasi barehull. Sedangkan untuk hasil perhitungan koefisien drag yang terkoreksi untuk variasi fin bisa dilihat pada table IV.10. Berdasarkan tabel tersebut, nilai koreksi yang dihasilkan adalah mendekati angka 1 sehingga nilai koefisien drag yang terkoreksi hampir sama dengan nilai koefisien drag hasil eksperimen.

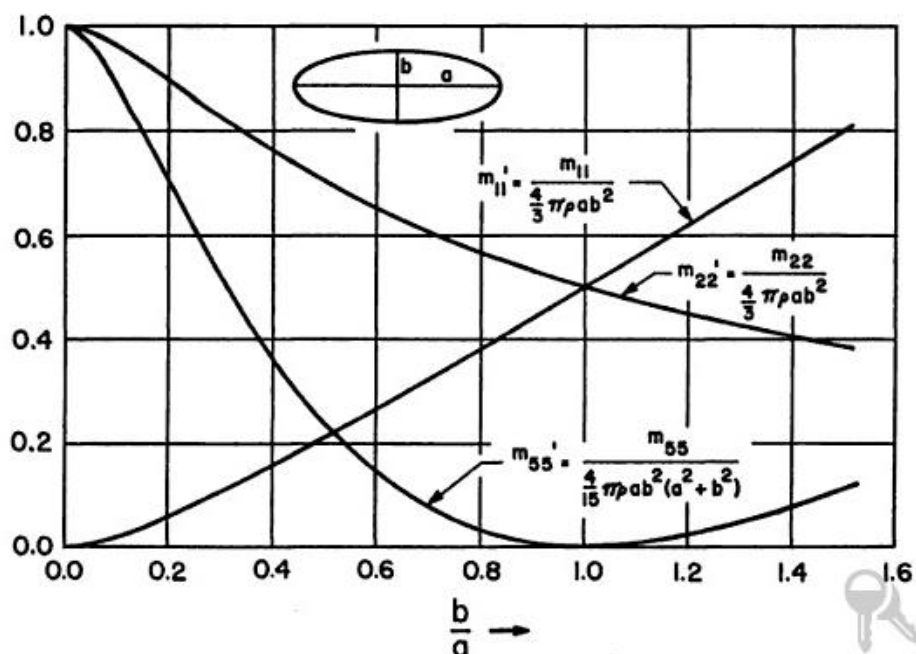
Tabel IV.10. Koreksi CD pada variasi fin

FIN								
Speed	Drag Coefficient				Lift Coefficient			
(m/s)	0 deg	10 deg	16 deg	20 deg	0 deg	10 deg	16 deg	20 deg
4,455	0,0044	0,0051	0,0069	0,0080	-	0,0029	0,0058	0,0088
5,198	0,0045	0,0050	0,0067	0,0080	-	0,0032	0,0064	0,0097
5,94	0,0041	0,0049	0,0066	0,0078	-	0,0033	0,0066	0,0099
6,683	0,0041	0,0047	0,0065	0,0078	-	0,0032	0,0065	0,0097
7,425	0,0042	0,0045	0,0063	0,0076	-	0,0032	0,0068	0,0100

BAB V

PERHITUNGAN KOEFISIEN HIDRODINAMIKA

Sebelum menghitung besarnya koefisien hidrodinamika kapal selam mini, langkah pertama yang harus kita lakukan adalah menghitung added mass. Berdasarkan perhitungan dengan metode *Prolate Ellipsoid* seperti pada metode perhitungan yang terdapat pada buku karangan *Newman* yang berjudul *Marine Hydrodynamic*, nilai *added mass* dapat dihitung sebagai berikut.



Gambar V.1. Kurva Perhitungan Added Mass

(Sumber : *Marine Hydrodynamics*)

Data Kapal :

L	=	6 m	a	=	0,5 x 6	=	3
D	=	0.533 m	b = c	=	0,533	=	0.2665
π	=	3.141593	q	=	c/b	=	1
ρ	=	1025 kg/m ³	p	=	a/b	=	11.25704
A	=	8.684 m ²	b/a	=		=	0.088833

Berdasarkan grafik pada gambar V.1 untuk nilai $b/a = 0.088$ maka:

$m'_{11} = 0.01$ maka nilai m_{11} adalah

$$m_{11} = m'_{11} \times 4/3 \pi p a b^2 = 9.148 \text{ kg}$$

$m'_{22} = 0.9$ maka nilai m_{22} adalah

$$m_{22} = m'_{22} \times 4/3 \pi p a b^2 = 823.324 \text{ kg}$$

$m'_{55} = 0.9$ maka nilai m_{55} adalah

$$m_{55} = m'_{55} \times 4/15 \pi p a b^2 (a^2 + b^2) = 1493.678 \text{ kg}$$

V.1 Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull

Perhitungan koefisien hidrodinamika untuk variasi barehull dilakukan dalam 5 kecepatan yang masing-masing kecepatan memiliki empat variasi sudut, yaitu 0° , 10° , 16° dan 20° . perhitungan ini dilakukan untuk kondisi kapal *full scale*.

V.1.1 Kecepatan 15.430 m/s

$$V_s = 15.43 \text{ m/s}$$

$$S_{fin} = 0$$

$$A_f = 8.684 \text{ m}^2$$

$$x_{fin} = 0$$

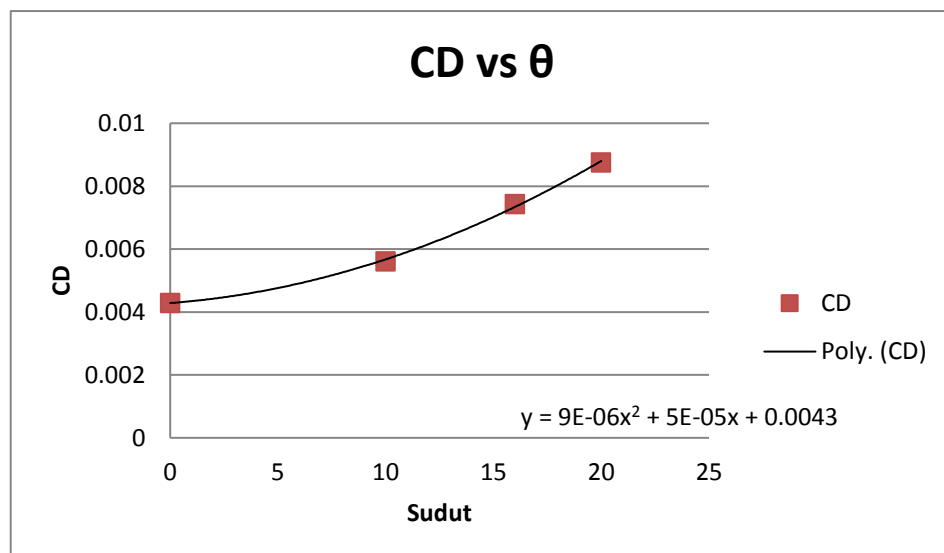
$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{L\delta f} = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho A_f V^2} = 0$$

$$F_y = 0 \text{ N}$$

$$\theta = 0$$

Grafik C_d akan dicari bentuk persamaan garisnya seperti pada gambar V.2 berikut.



Gambar V.2 Hull Drag : C_D vs θ , $V = 30$ knot

Dari gambar V.2 didapat data sebagai berikut :

$$a = 9 \times 10^{-6} \quad b = 0.00005 \quad c = 0.0043$$

Kemudian dari data CL akan dicari nilai slope CL_α dengan rumus $CL_\alpha = \frac{CL_2 - CL_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$.

Selanjutnya akan dicari nilai momen yang bekerja pada kapal selam. Nilai momen didapatkan dengan mengalikan gaya F_y dengan lengan. Jarak lengan yang diambil adalah setengah dari panjang kapal. Sehingga rumusnya adalah $M = F_y \cdot \frac{1}{2} L$. Dari nilai momen ini kemudian akan didapatkan nilai koefisien moment C_M dengan menggunakan rumus $C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho A_f V^2}$. Hasil nilai momen dan koefisien momen adalah sesuai dengan data pada tabel 18.

Tabel V.1 Nilai Momen dan Koefisien Momen Barehull, $V_s = 30$ knot

θ	F_y	Momen	C_M
0	0	0	0
10	14834.5	44503.6	0.0070
16	69722.3	209167	0.0329
20	89007.1	89007.1	0.0420

Maka nilai koefisien hidrodinamika kapal selam mini akan dihitung sebagai berikut.

1. Koefisien Added Mass

$$X_{\dot{u}} = m'_{11} = 9.148 \text{ kg}$$

2. Koefisien Axial Drag (Rumus II.19)

$$X_{uw} = -1/2 \rho A_f b = -0.5 \times 1025 \times 8.684 \times 0.00005 = -0.223 \text{ kg/m}$$

3. Koefisien Axial Drag (Rumus II.19)

$$X_{uv} = X_{uw} = -0.223 \text{ kg/m}$$

4. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 13)

$$X_{vr} = -Y_{\dot{v}} = -Z_{\dot{w}} = m'_{22} = -823.324 \text{ kg/rad}$$

5. Koefisien Added Mass Cross Term

$$X_{w\dot{w}} = Z_{\dot{w}} = 823.324 \text{ kg/rad} \quad (\text{Rumus II.13})$$

6. Koefisien added Mass Cross Term (Rumus II.13)

$$X_{rr} = -Y_{\dot{r}} = 0$$

7. Koefisien Fin Lift (Rumus II.26)

$$Y_{u\delta r} = \rho C_{L\delta f} S_{fin} = 1025 \times 0 \times 0 = 0$$

8. Gaya Body Lift dan Kontrol Fin (Rumus II.30)

$$Y_{uv} = Y_{uv_l} + Y_{uv_f} + Y_{uv_d} = 19.873$$

$$Y_{uv_l} = \frac{1}{2} \rho A_f C_{L\alpha}$$

$$Y_{uv_d} = \frac{1}{2} \rho A_f c$$

$$Y_{uv_f} = \rho C_{L\delta f} S_{fin}$$

9. Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin (Rumus II. 30)

$$Y_{ur} = Y_{ur_\alpha} + Y_{ur_f} = 9.148$$

$$Y_{ur_\alpha} = X_{\dot{u}} = 9.148$$

$$Y_{ur_f} = \rho C_{L\delta f} S_{fin} X_{fin} = 1025 \times 0 \times 0 \times 0 = 0$$

10. Koefisien Added Mass

$$Y_{\dot{v}} = m'_{22} = 823.324 \text{ kg}$$

11. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 13)

$$Y_{wp} = -Z_{\dot{w}} = -823.324 \text{ kg/rad}$$

12. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 13)

$$Y_{pq} = -Z_{\dot{q}} = 0$$

13. Koefisien Added Mass

$$Y_{\dot{r}} = N_{\dot{v}} = -M_{\dot{w}} = -Z_{\dot{q}} = 0$$

14. Koefisien Fin Lift (Rumus II.26)

$$Z_{u\dot{u}\delta s} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} = -1025 \times 0 \times 0 = 0$$

15. Gaya Body Lift dan Kontrol Fin (Rumus II. 30)

$$Z_{uw} = Z_{uw_l} + Z_{uw_f} + Z_{uw_d} = -19.873$$

$$Z_{uw_l} = -\frac{1}{2} \rho A_f C_{L\alpha}$$

$$Z_{uw_f} = \rho C_{L\delta f} S_{fin}$$

$$Z_{uw_d} = -Y_{uvd}$$

16. Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin (Rumus II. 30)

$$Z_{uq} = Z_{uq_\alpha} + Z_{uq_f} = 9.148$$

$$Z_{uq_\alpha} = X_{\ddot{u}} = 9.148$$

$$Z_{uq_f} = -Y_{urf} = 0$$

17. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 13)

$$Z_{vp} = Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} = 823.324 \text{ kg/rad}$$

18. Koefisien Added Mass

$$Z_{\dot{w}} = m'_{22} = 823.324 \text{ kg}$$

19. Koefisien Added Mass

$$Z_{\dot{q}} = 0$$

20. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 13)

$$Z_{rp} = Y_{\dot{r}} = 0$$

21. Koefisien Fin Moment (Rumus II.27)

$$M_{u\dot{u}\delta s} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} = -1000 \times 0 \times 0 \times 0 = 0$$

22. Body dan Fin dan Munk Moment (Rumus II. 30)

$$Muw = Muw_{\alpha} + Muw_f + Muw_l = -813.032$$

$$Muw_{\alpha} = -(Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})$$

$$Muw_f = \rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin}$$

$$Muw_l = \frac{1}{2} \rho A_f C_{M\alpha}$$

23. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 30)

$$Muq = Muq_{\alpha} + Muq_f = 0$$

$$Muq_{\alpha} = -Z_{\dot{q}} = 0$$

$$Muq_f = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin}^2 = -1025 \times 0 \times 0 \times 0^2 = 0$$

24. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II. 13)

$$Mvp = -Y_{\dot{r}}$$

25. Koefisien Added Mass

$$M_w = Z_{\dot{q}} = 0$$

26. Koefisien Added Mass

$$M_{\dot{q}} = m'_{55} = 1493.678 \text{ kg.m}^2/\text{rad}$$

27. Koefisien Fin Moment (Rumus No. 27)

$$N_{uu\delta r} = -\rho C_{L\delta f} S_{fin} x_{fin} = -1025 \times 0 \times 0 \times 0 = 0$$

28. Body dan Fin dan Munk Moment (Rumus II.30)

$$Nuv = Nuv_{\alpha} + Nuv_f + Nuv_l = 815.320$$

$$Nuv_{\alpha} = -(X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})$$

$$Nuv_f = N_{uu\delta r} = 0$$

$$Nuv_l = Muw_l$$

29. Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin (Rumus II. 30)

$$Nur = Nur_{\alpha} + Nur_f = 0$$

$$Nur_{\alpha} = Y_{\dot{r}} = 0$$

$$Nur_f = Muq_f = 0$$

30. Koefisien Added Mass

$$N_{\dot{v}} = Y_{\dot{r}} = 0$$

31. Koefisien Added Mass Cross Term (Rumus II.13)

$$N_{wp} = Z_{\dot{q}} = 0$$

32. Koefisien Added Mass

$$N_{\dot{r}} = m'_{55} = 1493.678$$

Cara yang sama juga dilakukan untuk menghitung koefisien hidrodinamika pada kondisi sudut 10° , 16° dan 20° . Hasil semua perhitungan kemudian direkapitulasi ke dalam tabel. Tabel V.2 merupakan hasil perhitungan koefisien hidrodinamika untuk kecepatan 15.433 m/s pada variasi barehull.

Tabel V.2 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, $V_s = 15.433 \text{ m/s}$

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	$X_{\dot{u}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	-0.223	-0.223	-0.223	-0.223	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	-0.223	-0.223	-0.223	-0.223	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uudr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	19.873	23.671	21.527	26.470	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	$Y_{\dot{v}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	$Y_{\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-19.873	-23.671	-21.527	-26.470	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	$Z_{\dot{w}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-813.032	-813.032	-813.032	-813.032	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uudr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	815.320	815.320	815.320	815.320	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	$N_{\dot{v}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	$N_{\dot{r}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.1.2 Kecepatan 18.006 m/s

Pada kecepatan 18.006 m/s juga akan dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamika. Namun perhitungan tersebut tidak diuraikan semua, karena cara perhitungannya sama saat menghitung pada kecepatan 15.433 m/s. Semua hasil perhitungan akan dimasukkan ke dalam tabel berikut seperti yang ditunjukkan pada tabel V.3.

Tabel V.3 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, $V_s = 18.006$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	$X_{\dot{u}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	-0.045	-0.045	-0.045	-0.045	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	-0.045	-0.045	-0.045	-0.045	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uadr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	19.772	23.193	21.393	38.033	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	$Y_{\dot{v}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	$Y_{\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-19.772	-23.193	-21.393	-38.033	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	$Z_{\dot{w}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-812.474	-812.474	-812.474	-812.474	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uadr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	815.877	815.877	815.877	815.877	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	$N_{\dot{v}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	$N_{\dot{r}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.1.3 Kecepatan 20.578 m/s

Pada kecepatan 20.578 m/s juga akan dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamika. Namun perhitungan tersebut tidak diuraikan semua, karena cara perhitungannya sama. Semua hasil perhitungan akan dimasukkan ke dalam tabel berikut seperti yang ditunjukkan pada tabel V.4.

Tabel V.4 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, $V_s = 20.578$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	X_u	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	0.009	0.009	0.009	0.009	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	0.009	0.009	0.009	0.009	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uudr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	19.933	22.828	21.794	21.816	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	Y_v	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	Y_r	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-19.933	-22.828	-21.794	-21.816	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	Z_w	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	Z_q	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-811.939	-811.939	-811.939	-811.939	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	M_w	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	M_q	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uudr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	816.412	816.412	816.412	816.412	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	N_v	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	N_r	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.1.4 Kecepatan 23.150 m/s

Hasil perhitungan koefisien hidrodinamika untuk kecepatan 23.150 m/s ditunjukkan pada tabel V.5.

Tabel V.5 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, $V_s = 23.150$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	X_{ii}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	0.013	0.013	0.013	0.013	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	0.013	0.013	0.013	0.013	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uudr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	19.999	22.504	21.959	22.180	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	$Y_{\dot{v}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	$Y_{\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-19.999	-22.504	-21.959	-22.180	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	$Z_{\dot{w}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-811.406	-811.406	-811.406	-811.406	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uudr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	816.946	816.946	816.946	816.946	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	$N_{\dot{v}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	$N_{\dot{r}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.1.5 Kecepatan 25.772 m/s

Tabel V.6 di bawah ini merupakan rekapitulasi hasil perhitungan koefisien hidrodinamika kapal selam mini pada kecepatan 25.772 m/s.

Tabel V.6 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Barehull, $V_s = 25.772$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	$X_{\dot{u}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	$X_{u\dot{w}}$	0.045	0.045	0.045	0.045	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	$X_{u\dot{v}}$	0.045	0.045	0.045	0.045	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	$X_{v\dot{r}}$	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	$X_{w\dot{q}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	$X_{r\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	$Y_{u\dot{u}dr}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	$Y_{u\dot{v}}$	19.571	22.217	21.754	26.661	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	$Y_{u\dot{r}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	$Y_{\dot{\phi}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	$Y_{w\dot{p}}$	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	$Y_{p\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	$Y_{\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	$Z_{u\dot{u}ds}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	$Z_{u\dot{w}}$	-19.571	-22.217	-21.754	-26.661	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	$Z_{u\dot{q}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	$Z_{v\dot{p}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	$Z_{w\dot{w}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	$Z_{r\dot{p}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	$M_{u\dot{u}ds}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	$M_{u\dot{w}}$	-810.619	-810.619	-810.619	-810.619	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	$M_{u\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	$M_{v\dot{p}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{w\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	$N_{u\dot{u}dr}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	$N_{u\dot{v}}$	817.732	817.732	817.732	817.732	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	$N_{u\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	$N_{\dot{\phi}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	$N_{w\dot{p}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	$N_{\dot{r}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.2 Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin

Koefisien hidrodinamika untuk variasi fin dilakukan dalam 5 kecepatan yang masing-masing kecepatan memiliki empat variasi sudut, yaitu 0° , 10° , 16° dan 20° . perhitungan ini juga dilakukan pada kondisi *full scale*. Pada variasi fin ini terdapat besaran luasan fin sebesar 1.173 m^2 yang akan dimasukkan dalam perhitungan, sehingga akan terlihat beberapa koefisien yang memiliki nilai berbeda dengan variasi barehull. Cara perhitungannya sama dengan cara sebelumnya, sehingga tidak perlu diuraikan secara detail. Hasil perhitungannya akan direkapitulasi saja ke dalam tabel.

V.2.1 Kecepatan 15.430 m/s

Hasil perhitungan koefisien hidrodinamika untuk kecepatan 15.430 m/s ditunjukkan pada tabel V.7.

Tabel V.7 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, $V_s = 15.430 \text{ m/s}$

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	X_a	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	0.101	0.101	0.101	0.101	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	0.101	0.101	0.101	0.101	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uadr}	0.000	3.512	7.024	10.536	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	23.703	28.199	32.940	39.115	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	18.370	27.592	36.814	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	Y_{ϕ}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	Y_r	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	-3.512	-7.024	-10.536	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uv}	-23.703	-21.175	-18.893	-18.044	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	-0.074	-9.296	-18.518	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	Z_w	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	-9.222	-18.444	-27.666	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-813.103	-803.881	-794.659	-785.437	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	-24.217	-48.434	-72.651	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uadr}	0.000	-9.222	-18.444	-27.666	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	815.248	806.026	796.804	787.582	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	-24.217	-48.434	-72.651	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	N_{ϕ}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	N_r	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.2.2 Kecepatan 18.006 m/s

Tabel V.8 di bawah ini merupakan hasil perhitungan koefisien hidrodinamika pada kecepatan 18.006 m/s untuk variasi fin.

Tabel V.8 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, $V_s = 18.006$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	X_{ii}	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	0.303	0.303	0.303	0.303	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	0.303	0.303	0.303	0.303	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uudr}	0.000	3.869	7.739	11.608	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	24.359	29.312	34.536	39.762	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	19.309	29.470	39.632	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	Y_v	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	Y_r	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	-3.869	-7.739	-11.608	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-24.359	-21.573	-19.058	-16.545	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	-1.013	-11.174	-21.335	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	Z_w	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	Z_q	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	-10.161	-20.322	-30.483	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-812.566	-802.405	-792.243	-782.082	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	-26.683	-53.366	-80.049	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	M_w	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	M_q	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uudr}	0.000	-10.161	-20.322	-30.483	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	815.786	805.625	795.463	785.302	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	-26.683	-53.366	-80.049	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	N_v	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	N_r	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.2.3 Kecepatan 20.578 m/s

Pada kecepatan 20.578 m/s juga akan dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamika. Namun perhitungan tersebut tidak diuraikan semua, karena cara perhitungannya sama. Semua hasil perhitungan akan dimasukkan ke dalam tabel berikut seperti yang ditunjukkan pada tabel V.9.

Tabel V.9 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, $V_s = 20.578 \text{ m/s}$

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	X_u	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	0.040	0.040	0.040	0.040	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	0.040	0.040	0.040	0.040	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uudr}	0.000	3.951	7.902	11.853	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	22.372	27.430	32.764	37.780	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	19.523	29.898	40.273	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	Y_v	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	Y_r	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	-3.951	-7.902	-11.853	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-22.372	-19.528	-16.960	-14.075	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	-1.227	-11.602	-21.977	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	Z_w	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	Z_q	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	-10.375	-20.750	-31.125	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-812.029	-801.654	-791.280	-780.905	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	-27.244	-54.488	-81.733	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	M_w	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	M_q	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uudr}	0.000	-10.375	-20.750	-31.125	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	816.322	805.947	795.573	785.198	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	-27.244	-54.488	-81.733	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	N_v	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	N_r	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.2.4 Kecepatan 23.150 m/s

Hasil perhitungan koefisien hidrodinamika untuk kecepatan 23.150 m/s ditunjukkan pada tabel V.10 berikut ini.

Tabel V.10 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, $V_s = 23.150$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	$X_{\dot{u}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	X_{uw}	0.202	0.202	0.202	0.202	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	X_{uv}	0.202	0.202	0.202	0.202	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	X_{vr}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	X_{wq}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	X_{rr}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	Y_{uadr}	0.000	3.901	7.803	11.704	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	Y_{uv}	22.351	27.346	32.613	37.756	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	Y_{ur}	9.148	19.393	29.639	39.884	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	$Y_{\dot{v}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	Y_{wp}	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	Y_{pq}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	$Y_{\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	Z_{uuds}	0.000	-3.901	-7.803	-11.704	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	Z_{uw}	-22.351	-19.543	-17.007	-14.347	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	Z_{uq}	9.148	-1.097	-11.342	-21.588	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	Z_{vp}	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	$Z_{\dot{w}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	Z_{rp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	M_{uuds}	0.000	-10.245	-20.490	-30.736	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	M_{uw}	-811.494	-801.248	-791.003	-780.758	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	M_{uq}	0.000	-26.904	-53.808	-80.711	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	M_{vp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	N_{uadr}	0.000	-10.245	-20.490	-30.736	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	N_{uv}	816.858	806.613	796.367	786.122	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	N_{ur}	0.000	-26.904	-53.808	-80.711	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	$N_{\dot{v}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	N_{wp}	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	$N_{\dot{r}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

V.2.5 Kecepatan 25.772 m/s

Tabel V.11 berikut ini menunjukkan hasil perhitungan koefisien hidrodinamika kapal selam mini saat kecepatan 25.772 m/s untuk variasi fin.

Tabel V.11 Nilai Koefisien Hidrodinamika Variasi Fin, $V_s = 25.772$ m/s

No	Parameter	Sudut				units	Description
		0	10	16	20		
1	$X_{\dot{u}}$	9.148	9.148	9.148	9.148	kg	Koefisien Added Mass
2	$X_{\dot{u}w}$	0.505	0.505	0.505	0.505	kg/m	Koefisien Axial Drag
3	$X_{\dot{u}v}$	0.505	0.505	0.505	0.505	kg/m	Koefisien Axial Drag
4	$X_{\dot{v}r}$	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
5	$X_{\dot{w}q}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
6	$X_{\dot{r}r}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
7	$Y_{\dot{u}udr}$	0.000	3.793	8.218	12.011	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
8	$Y_{\dot{u}v}$	22.811	28.109	33.419	38.288	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
9	$Y_{\dot{u}r}$	9.148	19.108	30.728	40.688	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
10	$Y_{\dot{v}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
11	$Y_{\dot{w}p}$	-823.324	-823.324	-823.324	-823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
12	$Y_{\dot{p}q}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
13	$Y_{\dot{r}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
14	$Z_{\dot{u}uds}$	0.000	-3.793	-8.218	-12.011	kg/(m.rad)	Koefisien Fin Lift
15	$Z_{\dot{u}w}$	-22.811	-20.523	-16.983	-14.267	kg/rad	Gaya Body Lift dan Kontrol Fin
16	$Z_{\dot{u}q}$	9.148	-0.812	-12.432	-22.391	kg/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
17	$Z_{\dot{v}p}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
18	$Z_{\dot{w}}$	823.324	823.324	823.324	823.324	kg	Koefisien Added Mass
19	$Z_{\dot{q}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg	Koefisien Added Mass
20	$Z_{\dot{r}p}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
21	$M_{\dot{u}uds}$	0.000	-9.960	-21.580	-31.540	kg/rad	Koefisien Fin Moment
22	$M_{\dot{u}w}$	-810.746	-800.786	-789.166	-779.206	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
23	$M_{\dot{u}q}$	0.000	-26.154	-56.668	-82.822	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
24	$M_{\dot{v}p}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
25	$M_{\dot{w}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
26	$M_{\dot{q}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
27	$N_{\dot{u}udr}$	0.000	-9.960	-21.580	-31.540	kg/rad	Koefisien Fin Moment
28	$N_{\dot{u}v}$	817.606	807.646	796.026	786.066	kg	Body dan Fin dan Munk Moment
29	$N_{\dot{u}r}$	0.000	-26.154	-56.668	-82.822	kg.m/rad	Gaya Added Mass Cross Term dan Kontrol Fin
30	$N_{\dot{v}}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass
31	$N_{\dot{w}p}$	0.000	0.000	0.000	0.000	kg.m/rad	Koefisien Added Mass Cross Term
32	$N_{\dot{r}}$	1493.678	1493.678	1493.678	1493.678	kg.m ² /rad ²	Koefisien Added Mass

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VI

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil perhitungan koefisien hidrodinamika pada bab sebelumnya didapat bahwa kapal mengalami gaya inersia *added mass* yang konstan pada tiap sudut dan kecepatan. Pada komponen sumbu x, kapal selam mengalami gaya inersia *added mass* X_{vr} sebesar - 823.324 kg/rad dan X_{wq} sebesar 823.324 kg/rad. Sedangkan pada sumbu y kapal selam mengalami gaya inersia *added mass* Y_{wp} sebesar -823.324 kg/rad. Untuk sumbu z mengalami gaya inersia *added mass* Z_{vp} sebesar 823.324 kg/rad.

Untuk nilai koefisien fin lift $Y_{uu\delta r}$ dan $Z_{uu\delta s}$ pada variasi kapal barehull bernilai nol yang artinya kapal selam tidak menerima *side force* tambahan dari fin. Hal ini dikarenakan kapal tidak memiliki fin. Hal serupa juga terjadi pada koefisien fin moment $M_{uu\delta s}$ dan $N_{uu\delta r}$. Hal berbeda bisa dijumpai pada bentuk variasi kapal selam fin. Dengan adanya penambahan fin pada bagian buritan kapal selam akan memberikan *side force* dan *moment* tambahan pada kapal selam.

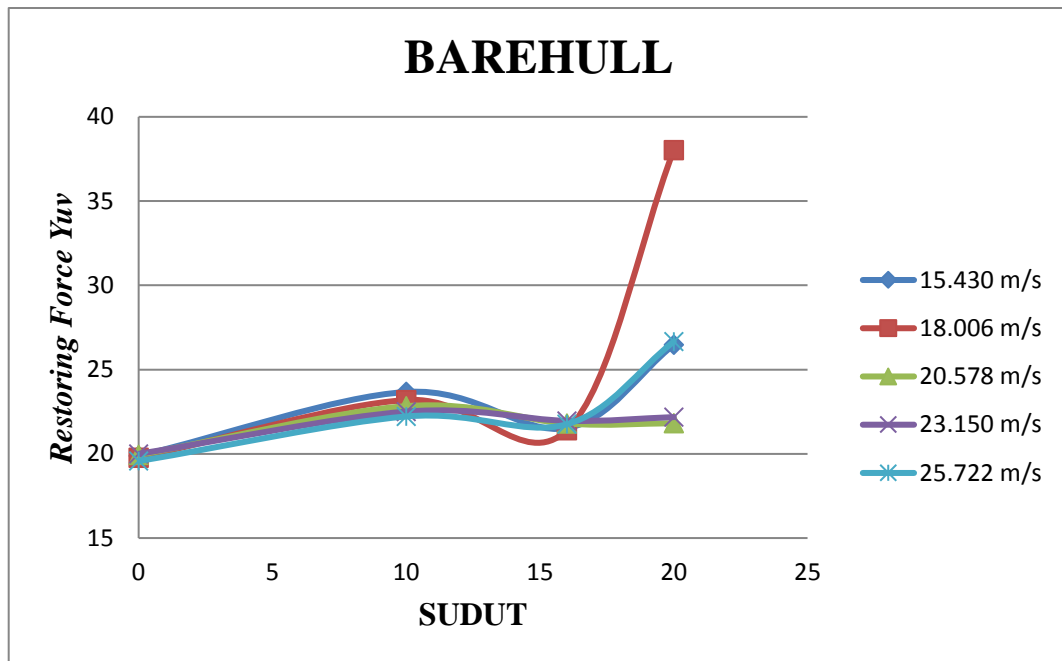
VI.1 Restoring Force

Selain mengalami gaya inersia *added mass*, kapal selam juga mengalami gaya hidrodinamika lainnya berupa *restoring force* dan *damping force*. Nilai *restoring force* dihitung untuk tiap variasi barehull dan fin.

VI.1.1 Variasi Barehull

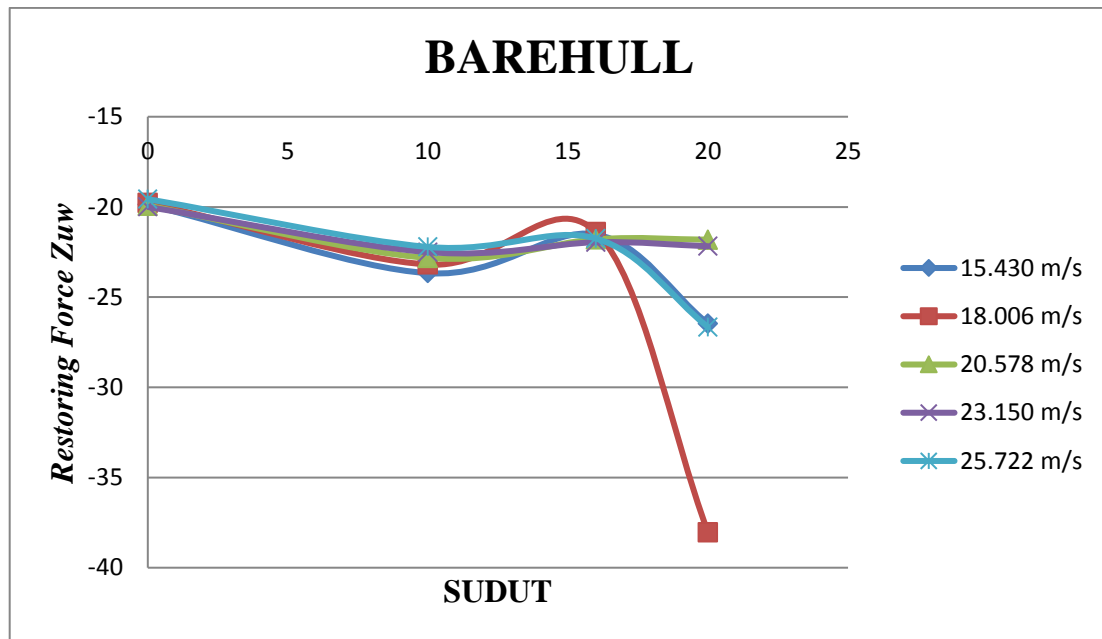
Pada variasi barehull, nilai *restoring force* cenderung berubah pada tiap sudutnya. Pada kecepatan 15.430 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu Y_{uv} untuk masing-masing sudutnya sebesar 19.873 kg/rad, 23.671 kg/rad, 21.527 kg/rad dan 26.470 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force* Z_{uw} yang masing-masing nilainya sebesar -19.873 kg/rad, -23.671 kg/rad, -21.527 kg/rad dan -26.470 kg/rad. Pada kecepatan 18.006 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu Y_{uv} untuk masing-masing sudutnya sebesar 19.772 kg/rad, 23.193 kg/rad, 21.393 kg/rad dan 38.003 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force* Z_{uw} yang masing - masing nilainya sebesar -19.772 kg/rad, -23.193 kg/rad, -21.393 kg/rad dan -38.003 kg/rad. Pada kecepatan 20.578 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu Y_{uv} untuk masing-masing sudutnya sebesar 19.933 kg/rad, 22.828 kg/rad, 21.794 kg/rad dan 21.816 kg/rad. Sedangkan

pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force* Z_{uw} yang masing - masing nilainya sebesar -19.933 kg/rad, -22.828 kg/rad, -21.794 kg/rad dan -21.816 kg/rad.



Gambar VI.1 *Restoring Force Yuv* Variasi Barehull

Pada kecepatan 20.578 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu Y_{uv} untuk masing-masing sudutnya sebesar 19.999 kg/rad, 22.504 kg/rad, 21.959 kg/rad dan 22.180 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force* Z_{uw} yang masing - masing nilainya sebesar -19.999 kg/rad, -22.504 kg/rad, -21.959 kg/rad dan -22.180 kg/rad. Pada kecepatan 25.772 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu Y_{uv} untuk masing-masing sudutnya sebesar 19.571 kg/rad, 22.217 kg/rad, 21.754 kg/rad dan 26.661 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force* Z_{uw} yang masing - masing nilainya sebesar -19.571 kg/rad, -22.217 kg/rad, -21.754 kg/rad dan -26.661 kg/rad.

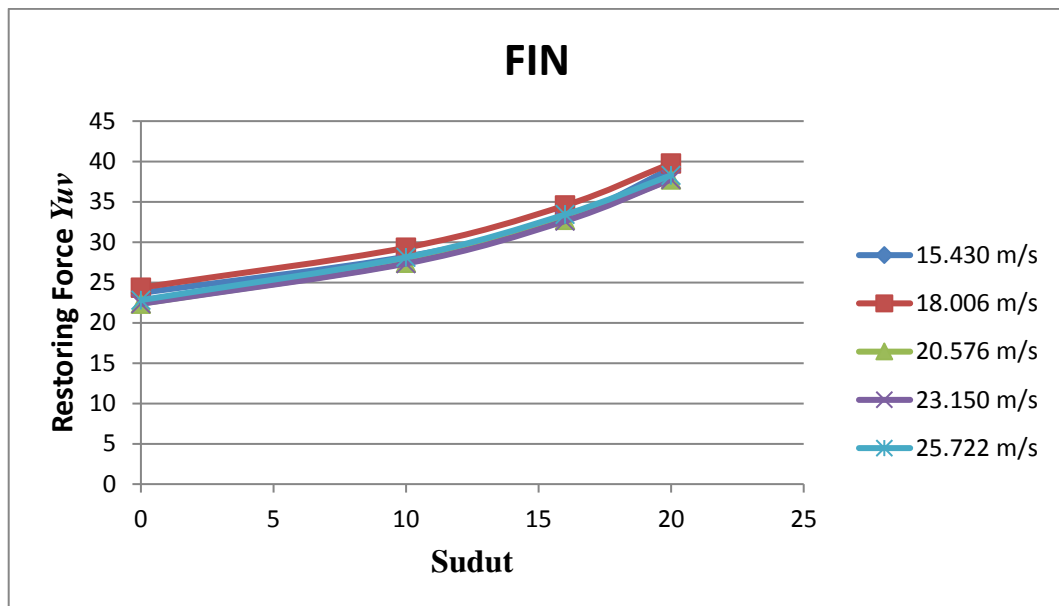


Gambar VI.2 *Restoring Force -Zuw* Variasi Barehull

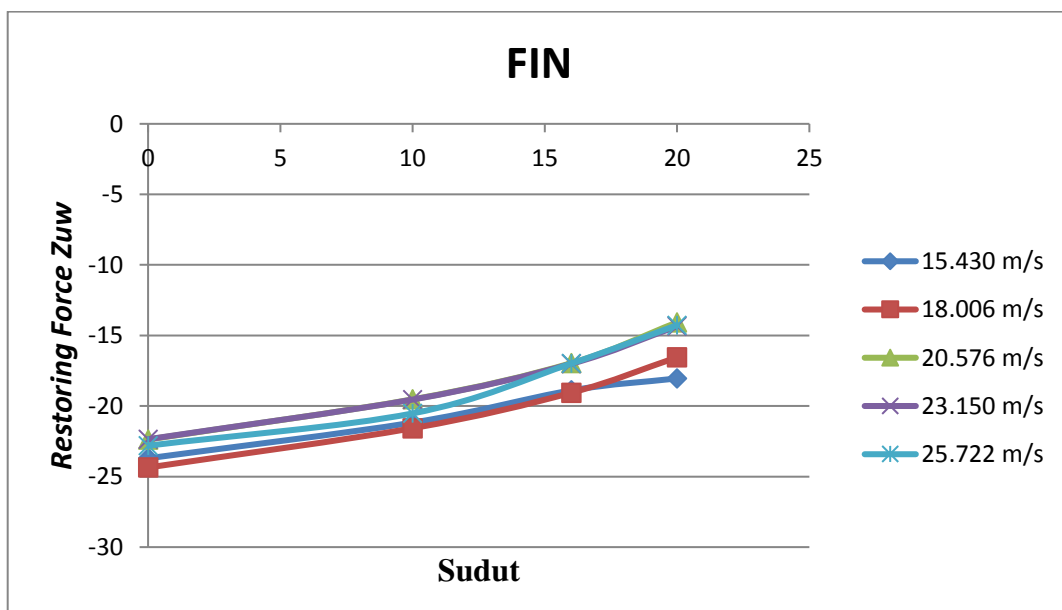
VI.1.2 Variasi Fin

Untuk kapal selam dengan variasi penambahan fin akan mengalami gaya *restoring force* yang nilainya tidak sama pada tiap sudutnya. Pada kecepatan 15.430 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu *Yuv* untuk masing-masing sudutnya sebesar 23.703 kg/rad, 28.199 kg/rad, 32.940 kg/rad dan 39.115 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force Zuw* yang masing - masing nilainya sebesar -23.703kg/rad, -21.175 kg/rad, -18.893 kg/rad dan -18.044 kg/rad. Pada kecepatan 18.006 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu *Yuv* untuk masing-masing sudutnya sebesar 24.359 kg/rad, 29.312 kg/rad, 34.536 kg/rad dan 39.762 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force Zuw* yang masing - masing nilainya sebesar -24.359 kg/rad, -21.573 kg/rad, -19.058 kg/rad dan -16.545 kg/rad. Pada kecepatan 20.578 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu *Yuv* untuk masing-masing sudutnya sebesar 22.372 kg/rad, 27.430 kg/rad, 32.764 kg/rad dan 37.780 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force Zuw* yang masing - masing nilainya sebesar -22.372 kg/rad, -19.528 kg/rad, -16.960 kg/rad dan -14.075 kg/rad. Pada kecepatan 23.150 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu *Yuv* untuk masing-masing sudutnya sebesar 22.351 m/s kg/rad, 27.346 kg/rad, 32.613 kg/rad dan 37.756 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force Zuw* yang masing -

masing nilainya sebesar -22.351 kg/rad, -19.543 kg/rad, -17.007 kg/rad dan -14.347 kg/rad. Pada kecepatan 25.772 m/s, kapal selam mengalami gaya *restoring force* pada komponen sumbu y yaitu Y_{uv} untuk masing-masing sudutnya sebesar 22.811 kg/rad, 28.109 kg/rad, 33.419 kg/rad dan 38.288 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *restoring force* Z_{uw} yang masing - masing nilainya sebesar -22.811 kg/rad, -20.523 kg/rad, -16.983 kg/rad dan -14.267 kg/rad.



Gambar VI.3 Restoring Force Y_{uv} Variasi Fin

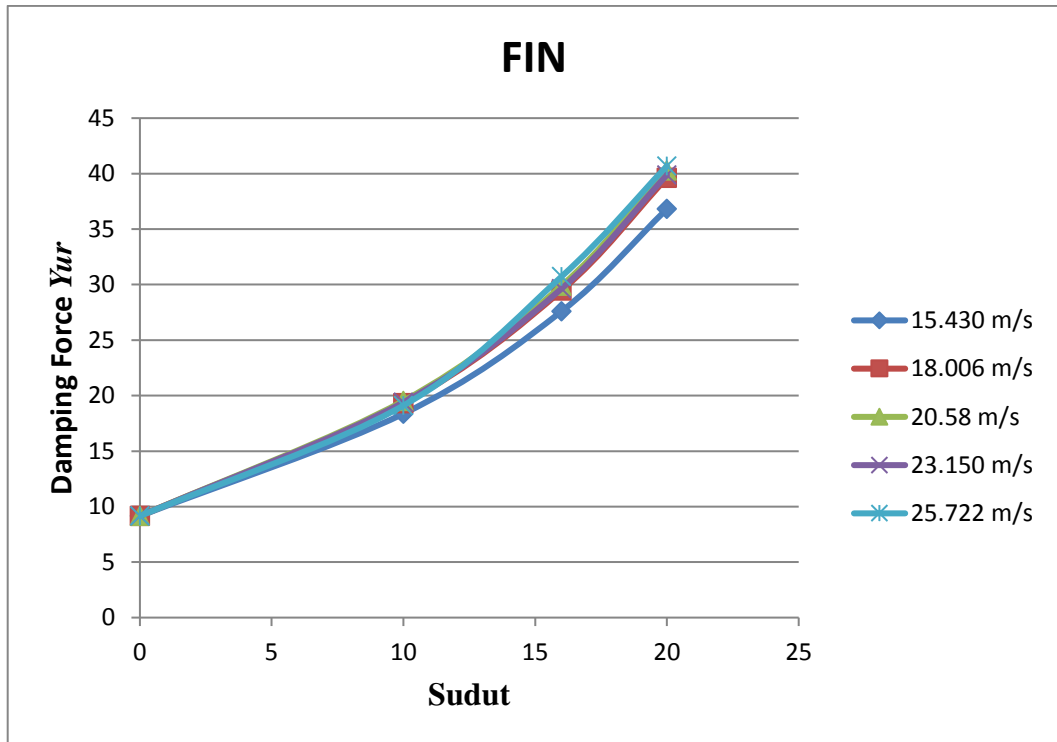


Gambar VI.4 Restoring Force $-Z_{uw}$ Variasi Fin

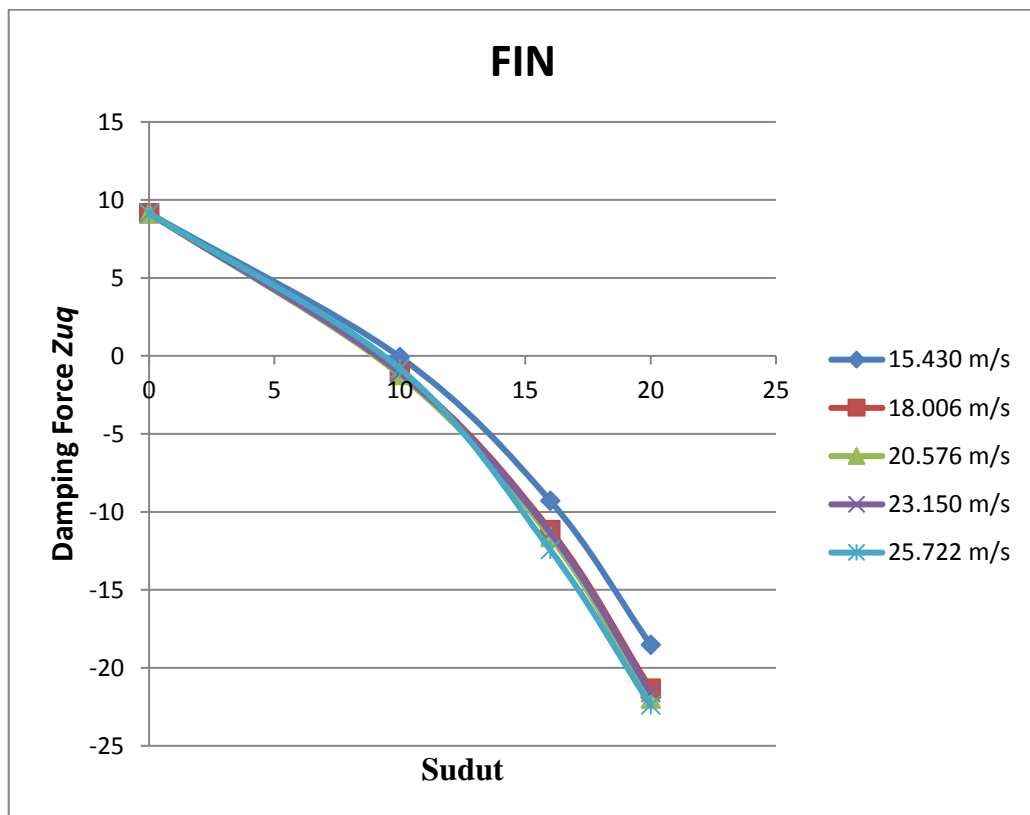
VI.2 Damping Force

Selain mengalami *restoring force*, kapal selam juga mengalami gaya hidrodinamika lainnya berupa *damping force*. Nilai *damping force* dihitung untuk tiap variasi barehull dan fin. Untuk nilai *damping force*, kapal selam variasi barehull mengalami *damping force* yang nilainya relatif sama, yaitu *Yur* dan *Zuq* sebesar 9.148 kg/rad.

Untuk kapal selam dengan variasi penambahan fin akan mengalami gaya *damping force* yang nilainya tidak sama pada tiap sudutnya. Pada kecepatan 15.430 m/s, kapal selam mengalami gaya *damping force* pada komponen sumbu y yaitu *Yur* untuk masing-masing sudutnya sebesar 9.148 kg/rad, 18.370 kg/rad, 27.592 kg/rad dan 36.814 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *damping force Zuq* yang masing - masing nilainya sebesar 9.148 kg/rad, -0.074 kg/rad, -9.296 kg/rad dan -18.518 kg/rad. Pada kecepatan 18.006 m/s, kapal selam mengalami gaya *damping force* pada komponen sumbu y yaitu *Yur* untuk masing-masing sudutnya sebesar 9.148 kg/rad, 19.309 kg/rad, 29.470 kg/rad dan 39.632 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *damping force Zuq* yang masing - masing nilainya sebesar 9.148 kg/rad, -1.013 kg/rad, -11.174 kg/rad dan -21.335 kg/rad. Pada kecepatan 20.578 m/s, kapal selam mengalami gaya *damping force* pada komponen sumbu y yaitu *Yur* untuk masing-masing sudutnya sebesar 9.148 kg/rad, 19.523 kg/rad, 29.898 kg/rad dan 40.273 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *damping force Zuq* yang masing - masing nilainya sebesar 9.148 kg/rad, -1.227 kg/rad, -11.602 kg/rad dan -21.977 kg/rad. Pada kecepatan 23.150 m/s, kapal selam mengalami gaya *damping force* pada komponen sumbu y yaitu *Yur* untuk masing-masing sudutnya sebesar 9.148 kg/rad, 19.393 kg/rad, 29.639 kg/rad dan 39.884 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *damping force Zuq* yang masing - masing nilainya sebesar 9.148 kg/rad, -1.097 kg/rad, -11.342 kg/rad dan -21.558 kg/rad. Pada kecepatan 25.772 m/s, kapal selam mengalami gaya *dampring force* pada komponen sumbu y yaitu *Yur* untuk masing-masing sudutnya sebesar 9.148 kg/rad, 19.108 kg/rad, 30.728 kg/rad dan 40.688 kg/rad. Sedangkan pada komponen sumbu z mengalami gaya *damping force Zuq* yang masing - masing nilainya sebesar 9.148 kg/rad, -0.812 kg/rad, -12.432 kg/rad dan -22.391 kg/rad.



Gambar VI.5 *Damping Force Yur Variasi Fin*



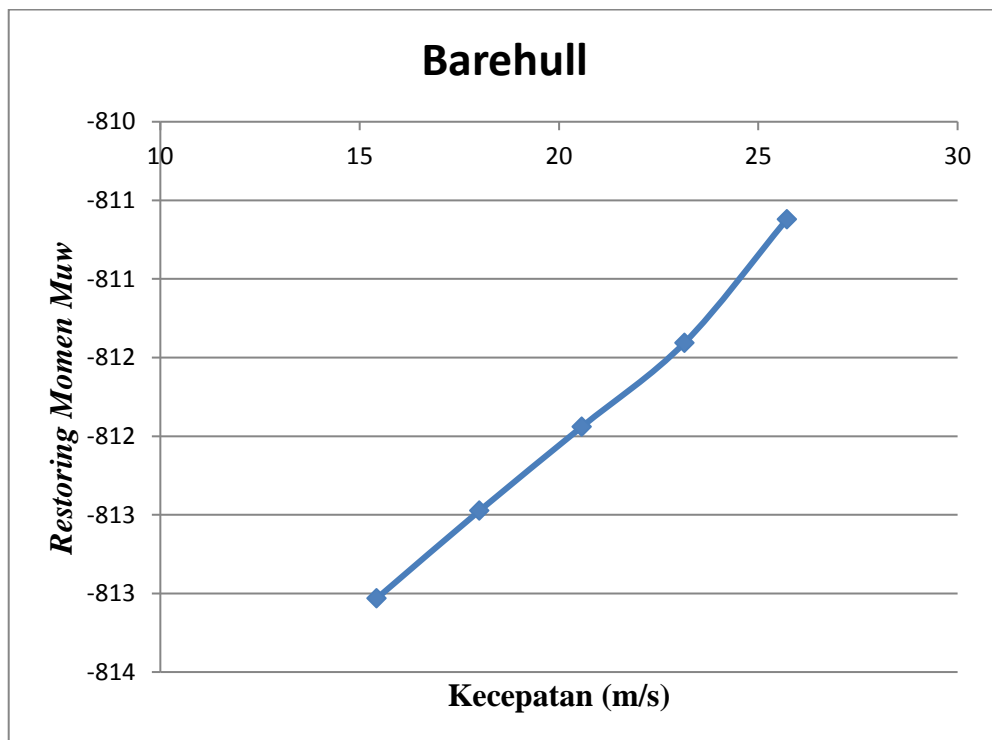
Gambar VI.6 *Damping Force Zuq Variasi Fin*

VI.3 Restoring Momen

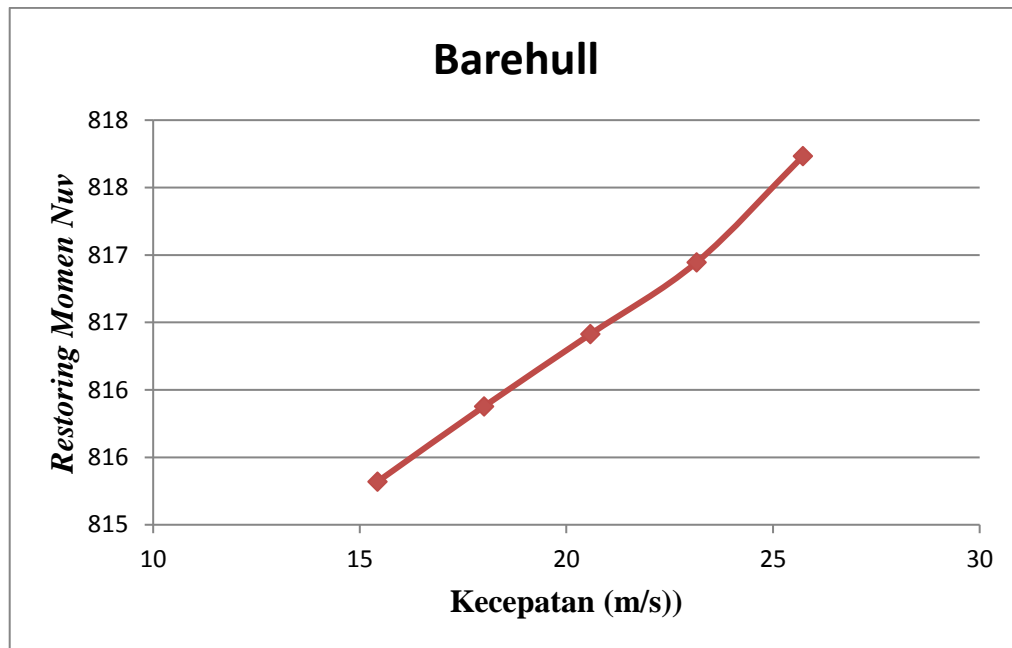
Di samping menerima *restoring force*, kapal selam juga menerima *restoring moment*. Nilai *restoring moment* dihitung untuk tiap variasi barehull dan fin.

VI.3.1 Variasi Barehull

Untuk variasi kapal selam barehull cenderung memiliki nilai *restoring moment* dan *damping moment* yang sama untuk tiap sudutnya. Pada kondisi kecepatan 15.430 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* M_{uw} dan N_{uv} masing-masing sebesar -813.032 kg dan 815.320 kg. Pada kondisi kecepatan 18.006 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* M_{uw} dan N_{uv} masing-masing sebesar -812.474 kg dan 815.877 kg. Pada kondisi kecepatan 20.578 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* M_{uw} dan N_{uv} masing-masing sebesar -811.939 kg dan 816.412 kg. Pada kondisi kecepatan 23.150 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* M_{uw} dan N_{uv} masing-masing sebesar -811.406 kg dan 816.946 kg. Sedangkan pada kondisi kecepatan 25.772 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* M_{uw} dan N_{uv} masing-masing sebesar -810.619 kg dan 817.732 kg.



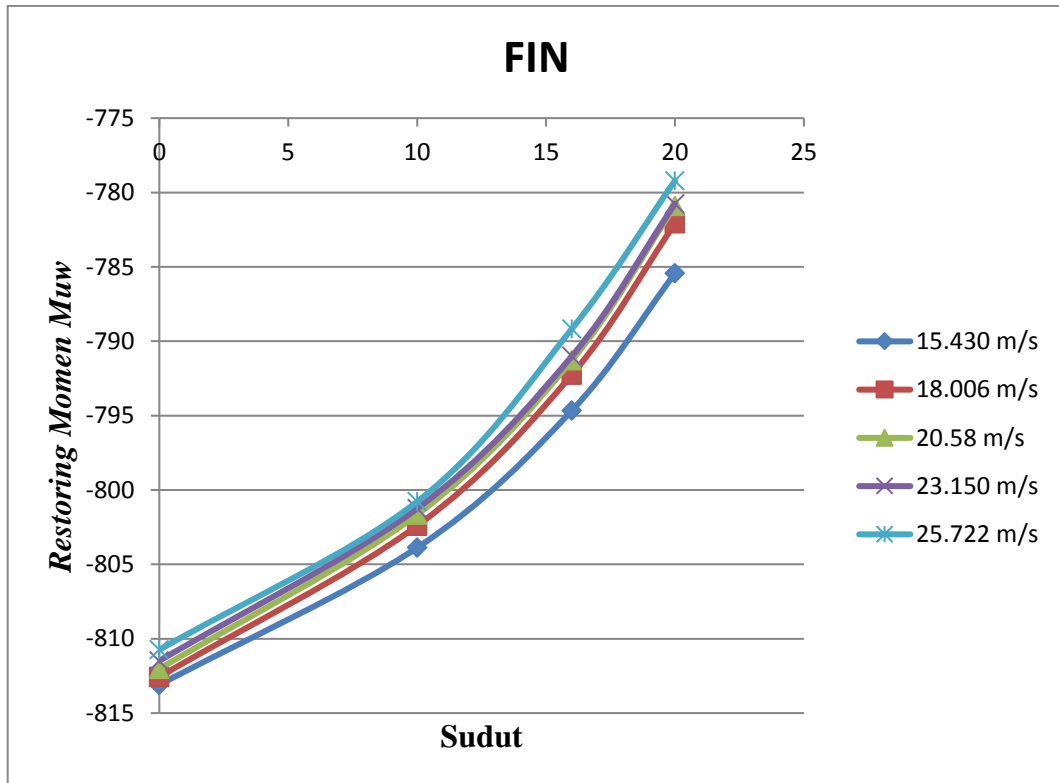
Gambar VI.7 *Restoring Momen M_{uw} Variasi Barehull*



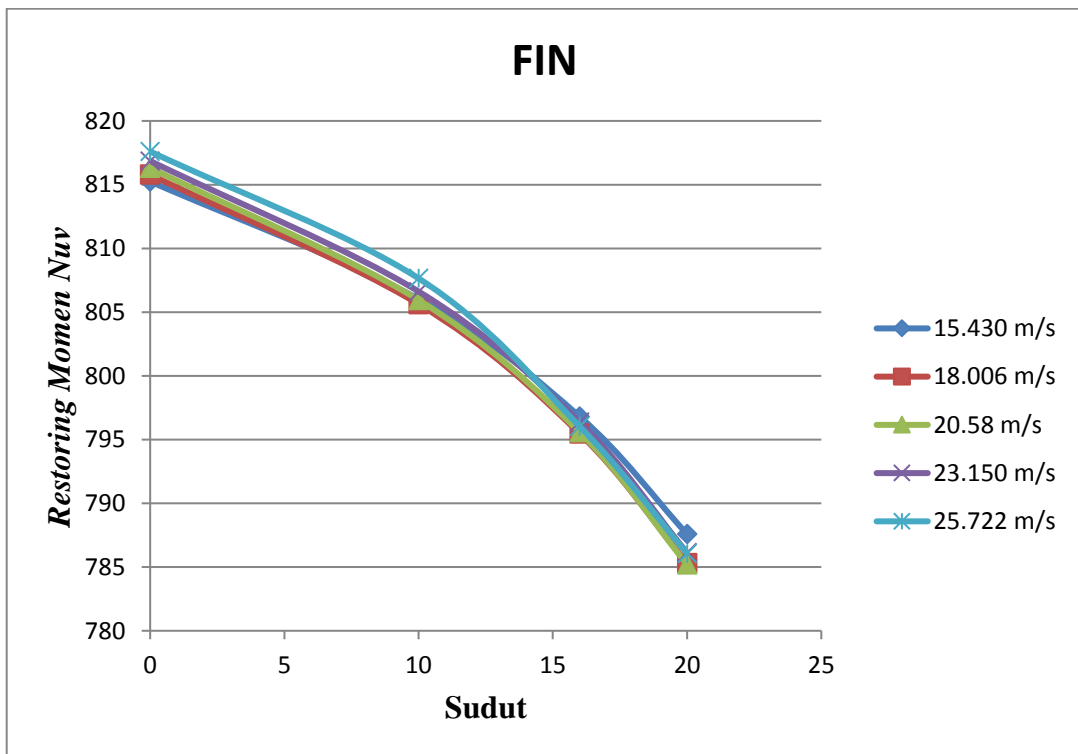
Gambar VI.8 *Restoring Momen Nuv* Variasi Barehull

VI.3.2 Variasi Fin

Untuk variasi penambahan fin, kapal selam menerima *restoring moment* dan damping moment. Pada kecepatan 15.430 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* *Muw* terbesar pada sudut 20° sebesar -785.437 kg dan terendah pada sudut 0° sebesar -813.103 kg. sedangkan *restoring moment* *Nuv* terbesar terjadi pada sudut 0° sebesar 815.248 kg dan terendah pada sudut 20° sebesar 787.582 kg. Pada kecepatan 18.006 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* *Muw* terbesar pada sudut 20° sebesar -782.082 kg dan terendah pada sudut 0° sebesar -812.566 kg. sedangkan *restoring moment* *Nuv* terbesar terjadi pada sudut 0° sebesar 815.786 kg dan terendah pada sudut 20° sebesar 785.302 kg. Pada kecepatan 20.578 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* *Muw* terbesar pada sudut 20° sebesar -780.905 kg dan terendah pada sudut 0° sebesar -812.029 kg. sedangkan *restoring moment* *Nuv* terbesar terjadi pada sudut 0° sebesar 816.322 kg dan terendah pada sudut 20° sebesar 785.198 kg. Pada kecepatan 23.150 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* *Muw* terbesar pada sudut 20° sebesar -780.758 kg dan terendah pada sudut 0° sebesar -811.494 kg. sedangkan *restoring moment* *Nuv* terbesar terjadi pada sudut 0° sebesar 816.858 kg dan terendah pada sudut 20° sebesar 786.122 kg. Pada kecepatan 25.722 m/s, kapal selam menerima *restoring moment* *Muw* terbesar pada sudut 20° sebesar -779.206 kg dan terendah pada sudut 0° sebesar -810.746 kg. sedangkan *restoring moment* *Nuv* terbesar terjadi pada sudut 0° sebesar 817.606 kg dan terendah pada sudut 20° sebesar 786.066 kg.



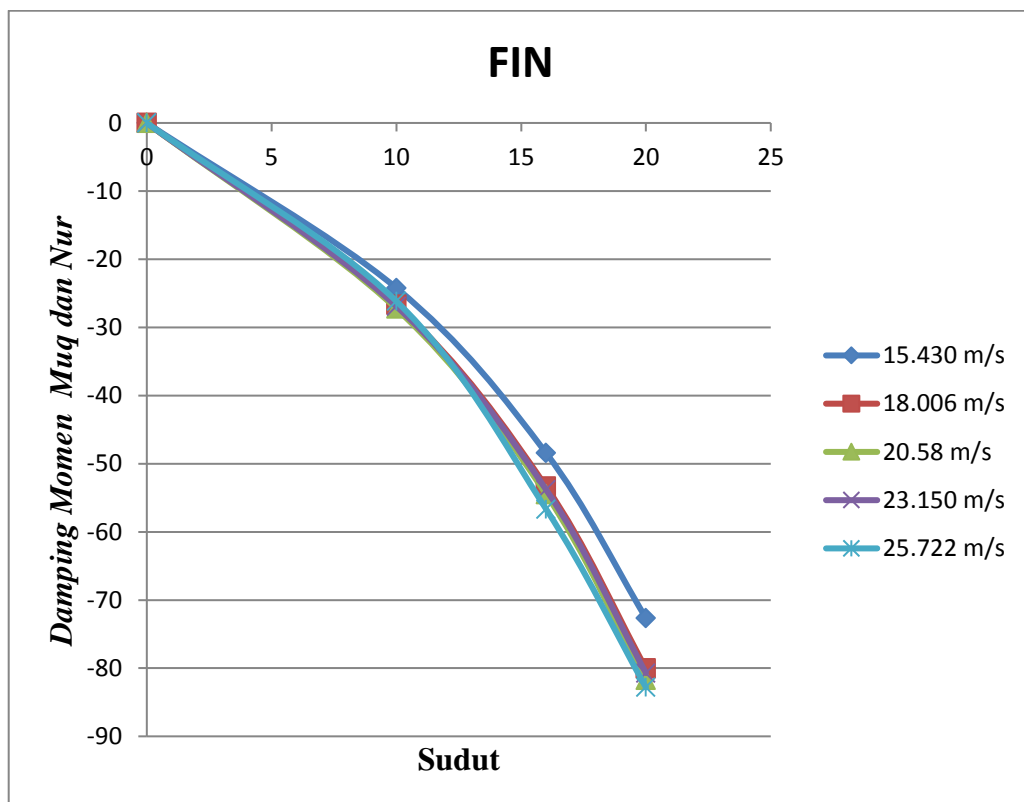
Gambar VI.9 *Restoring Momen Muw* Variasi Fin



Gambar VI.10 *Restoring Moment Nuv* Variasi Fin

VI.4 Damping Momen

Pada variasi barehull tidak menerima damping momen akibat kontrol fin. Sedangkan nilai *damping moment* untuk variasi fin bervariasi. *Damping moment* tersebut terdiri atas *Muq* dan *Nur* yang memiliki nilai sama dan cenderung semakin kecil untuk tiap sudutnya. Pada kecepatan 15.430 m/s, nilai *Muq* dan *Nur* masing-masing sebesar 0 kg.m/rad, -24.217 kg.m/rad, -48.434 kg.m/rad dan -72.651 kg.m/rad untuk tiap sudutnya. Sedangkan pada kecepatan 18.006 m/s, nilai *Muq* dan *Nur* masing-masing sebesar 0 kg.m/rad, -26.683 kg.m/rad, -53.366 kg.m/rad dan -80.049 kg.m/rad untuk tiap sudutnya. Pada kecepatan 20.578 m/s, nilai *Muq* dan *Nur* masing-masing sebesar 0 kg.m/rad, -27.244 kg.m/rad, -54.488 kg.m/rad dan -81.733 kg.m/rad untuk tiap sudutnya. Pada kecepatan 23.150 m/s, nilai *Muq* dan *Nur* masing-masing sebesar 0 kg.m/rad, -26.904 kg.m/rad, -53.808 kg.m/rad dan -80.711 kg.m/rad untuk tiap sudutnya. Sedangkan pada kecepatan 25.772 m/s, nilai *Muq* dan *Nur* masing-masing sebesar 0 kg.m/rad, -26.154 kg.m/rad, -56.668 kg.m/rad dan -82.822 kg.m/rad untuk tiap sudutnya.



Gambar VI.11 *Damping Momen Muq dan Nur Variasi Fin*

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

VII.1 Kesimpulan

1. Adanya fin sebagai kontrol perlakuan gerak kapal memberikan pengaruh yang besar. Salah satunya adalah memberikan penambahan koefisien *fin lift force* dan *koefisien fin moment*.
2. Komponen hidrodinamika kapal seperti *Restoring force*, *Restoring Moment* M_{uw} dan koefisien fin lift moment $Y_{uu\delta r}$ yang diterima kapal selam semakin besar seiring dengan perubahan sudut pada variasi fin.
3. Komponen hidrodinamika yang semakin kecil seiring dengan perubahan sudut pada variasi fin terjadi pada komponen *damping force*, *restoring moment* N_{uv} , *damping moment*, koefisien *fin lift* $Z_{uu\delta s}$ dan koefisien *fin moment*.
4. Kapal selam tidak menerima gaya tambahan *fin lift* dan *fin moment* karena tidak ada penambahan fin pada bagian buritan kapal.
5. Pada variasi barehull terjadi peningkatan nilai *restoring force* Y_{uv} dan Z_{uw} yang diterima oleh kapal selam untuk tiap sudutnya, yaitu 19.873 kg/rad hingga 26.470 kg/rad.
6. Komponen hidrodinamika *restoring force*, *damping force*, dan *restoring moment* semakin besar seiring dengan perubahan kecepatan kapal. Sedangkan komponen *damping moment* semakin kecil.
7. Kapal selam menerima gaya inersia *added mass* yang konstan untuk tiap variasi kapal, sudut dan kecepatan.
8. Besarnya nilai koefisien drag dan koefisien lift berbanding lurus dengan kecepatan kuadrat kapal.

VII.2 Saran

Pada dasarnya ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung koefisien hidrodinamika. Jadi, data pada penelitian tugas akhir ini bisa digunakan lagi untuk menghitung koefisien hidrodinamika dengan metode lainnya. Setelah semua perhitungan selesai, penulis sarankan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai dynamic stability dan control pada kapal selam.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Allmendinger, E. E. (1990). *Submersible Vehicles Systems Design*. Jersey: SNAME.
- Anderson, J. D. (2001). *Fundamentals of Aerodynamics Third Edition*. NewYork: McGraw-Hill.
- Baehr, H. D., & Stephan, K. (2011). *Heat and Mass Transfer*. NewYork: Springer.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Jefferson: Macmillan Company.
- Carlton, J. S. (2006). *Marine Propellers and Propulsion*. London: Elsevier.
- Edward, L. (1988). *Principles of Naval Architeture Second Revision*. Jersey: SNAME.
- Hartnett, J. P., & Irvine, T. F. (1991). *Advances in heat Transfer*. California: Academic Press INC.
- Levina, D. (2008). *Peramalan Menggunakan Metode Vector Autoregressive Moving Average (Varma)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Maskell, E. C., "A Theory of Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Close Wind Tunnel," ARC R&M 3400, 1963.
- Makridakis, Spyros, & Wheelwright, S. C. (1999). *Metode dan Aplikasi Peramalan*. Jakarta: Binarupa Aksara.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2004). *Mekanika Fluida*. Jakarta: Erlangga.
- Pereira, J. D. (2011). *Wind Tunnels Aerodynamics Models and Experiments*. NewYork: Nova Science Publishers.
- Pozrikidis, C. (2009). *Fluid Dynamics*. NewYork: Springer Science and Business Media.
- Prisdianto, A., & Sulisetyono, A. (2012). *Perancangan ROV dengan Hydrodynamic Performance yang Baik untuk Misi Monitoring Bawah Laut*. Surabaya: ITS.
- Shang, D. (2011). *Theory of Heat Transfer with Forced Convection Film Flows*. NewYork: Springer.
- Shaughnessy, A. J., Katz, I. M., & Schaffer, J. P. (2005). *Introduction to Fluid Mechanics*. New york: Oxford University Press.
- Sulisetyono, A. (2009). Dynamics Stability Prediction of the Mini-Submarine in Underwater Mission. *Seminar Nasional Pascasarjana IX*. Surabaya: ITS.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A DOKUMENTASI PERCOBAAN

1. Pengatur frekuensi kecepatan pada *wind tunnel*



2. Alat pengukuran sudut pada *wind tunnel*



3. Alat Ukur *Drag Force*



4. Alat Ukur *Lift Force*



5. Kalibrasi



6. Indikator Kecepatan Pada *Wind Tunnel*



7. Bentuk *Barehull* Model



8. Bentuk Variasi Fin Model



9. Variasi Sudut 0°



10. Variasi Sudut 10°



11. Variasi Sudut 16°



12. Variasi Sudut 20°



LAMPIRAN B

DOKUMENTASI HASIL PERCOBAAN

1. Rekapitulasi Hasil Percobaan Untuk Variasi Barehull

VARIASI BAREHULL												
SUDUT = 0												
No	V	P	Δh [cm]	S [cm]	RT				LIFT			
					1	2	3	RATA-RATA	1	2	3	RATA-RATA
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.070	0.070	0.068	0.069	-	-	-	-
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.055	0.060	0.058	0.058	-	-	-	-
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.047	0.045	0.045	0.046	-	-	-	-
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.035	0.036	0.035	0.035	-	-	-	-
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.025	0.025	0.027	0.026	-	-	-	-
SUDUT = 10												
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.085	0.087	0.085	0.086	0.05	0.05	0.05	0.05
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.065	0.07	0.075	0.070	0.04	0.04	0.04	0.04
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.055	0.055	0.06	0.057	0.03	0.03	0.03	0.03
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.045	0.045	0.045	0.045	0.02	0.02	0.02	0.02
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.033	0.035	0.035	0.034	0.01	0.01	0.01	0.01
SUDUT = 16												
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.125	0.120	0.125	0.123	0.14	0.14	0.14	0.140
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.100	0.105	0.100	0.102	0.11	0.11	0.11	0.110
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.080	0.080	0.085	0.082	0.09	0.09	0.09	0.090
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.060	0.065	0.060	0.062	0.07	0.07	0.07	0.070
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.045	0.045	0.045	0.045	0.04	0.05	0.05	0.047
SUDUT = 20												
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.150	0.150	0.145	0.148	0.190	0.190	0.200	0.193
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.120	0.115	0.120	0.118	0.150	0.150	0.150	0.150
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.095	0.100	0.095	0.097	0.120	0.120	0.120	0.120
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.075	0.075	0.075	0.075	0.090	0.090	0.090	0.090
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.055	0.055	0.050	0.053	0.060	0.060	0.060	0.060

2. Rekapitulasi Hasil Percobaan Untuk Variasi Fin

VARIASI FIN												
SUDUT = 0												
No	V	P	Δh [cm]	S [cm]	RT				LIFT			
					1	2	3	RATA-RATA	1	2	3	RATA-RATA
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.080	0.080	0.080	0.080	-	-	-	-
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.065	0.060	0.065	0.063	-	-	-	-
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.050	0.050	0.050	0.050	-	-	-	-
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.040	0.040	0.045	0.042	-	-	-	-
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.030	0.030	0.030	0.030	-	-	-	-
SUDUT = 10												
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.085	0.085	0.085	0.085	0.060	0.060	0.060	0.060
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.07	0.075	0.075	0.073	0.050	0.050	0.050	0.050
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.06	0.06	0.06	0.060	0.040	0.040	0.040	0.040
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.045	0.045	0.05	0.047	0.030	0.030	0.030	0.030
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.035	0.035	0.035	0.035	0.020	0.020	0.020	0.020
SUDUT = 16												
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.120	0.120	0.120	0.120	0.130	0.130	0.130	0.130
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.060	0.065	0.060	0.062	0.060	0.060	0.060	0.060
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.050	0.045	0.045	0.047	0.040	0.040	0.040	0.040
SUDUT = 20												
1	7.425	33.76751	0.43905	1.70	0.145	0.145	0.145	0.145	0.190	0.190	0.190	0.190
2	6.683	27.35577	0.355684	1.37	0.120	0.120	0.120	0.120	0.150	0.150	0.150	0.150
3	5.94	21.61121	0.280992	1.09	0.095	0.095	0.095	0.095	0.120	0.120	0.120	0.120
4	5.198	16.54926	0.215176	0.83	0.075	0.075	0.075	0.075	0.090	0.090	0.090	0.090
5	4.455	12.1563	0.158058	0.61	0.055	0.055	0.055	0.055	0.060	0.060	0.060	0.060

BIODATA PENULIS



Yogi Ardiyansyah, itulah nama lengkap penulis. Penulis dilahirkan di Bangkalan pada 7 Februari 1992 silam. Penulis merupakan anak kedua dari 4 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Aisyah, kemudian melanjutkan ke SDN Socah II, SMPN 5 Bangkalan dan SMAN 3 Bangkalan. Setelah lulus SMA, penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2010 melalui jalur SNMPTN tulis.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah penulis juga pernah menjadi Staff Departemen Dalam Negeri Himpunan Mahasiswa Teknik Perkapalan 2011/2012 dan Staff Departemen Pendidikan Himpunan Mahasiswa Teknik Perkapalan 2012/2013 serta aktif dalam kegiatan Semarak Mahasiswa Perkapalan (SAMPAN) 7 ITS.

Penulis tercatat pernah menjadi *grader* untuk mata kuliah Statistik dan Probabilitas, dan Konstruksi dan Kekuatan Kapal II.

Email: yogi.ardiyansyah10@gmail.com